

UNIVERSITE DU QUEBEC

MEMOIRE PRESENTE A
UNIVERSITE DU QUEBEC A TROIS-RIVIERES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAITRISE EN SCIENCES DES PATES ET PAPIERS

PAR
CLAUDE PELLETIER

BLANCHIMENT AU PEROXYDE DE LA PATE DESENCREE DANS
UN TRITURATEUR A HAUTE CONSISTANCE

JUILLET 1992

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

TABLE DES MATIERES

	page
REMERCIEMENTS	vi
RESUME	vii
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES	xiv
1- INTRODUCTION	1
2- REVUE DE LA LITTERATURE	3
2.1 La fibre désencrée de papier journal	3
2.1.1 Pourquoi désencrer le papier journal	3
2.1.2 L'évolution du désencrage	6
2.2 Les opérations fondamentales du désencrage	7
2.2.1 Le décrochage de l'encre	10
2.2.2 L'élimination de l'encre	12
2.2.2.1 La technique de lavage	12
2.2.2.2 La technique de flottation	14
2.3 Les produits chimiques utilisés pour le désencrage	17
2.3.1 L'hydroxyde de sodium (NaOH)	17
2.3.2 Le peroxyde d'hydrogène (H ₂ O ₂)	19

2.3.3 Le silicate de sodium (Na_2SiO_3)	20
2.3.4 Le chlorure de calcium (CaCl_2)	21
2.3.5 Les surfactants	21
2.3.6 Les séquestrants	22
2.4 Le blanchiment de la pâte désencrée de papier journal	23
2.4.1 Pourquoi blanchir la pâte désencrée de papier journal	23
2.4.2 Les agents de blanchiment	24
2.4.3 Le point d'addition de l'agent blanchissant	24
2.4.3.1 Blanchiment simultané au cycle de désencrage	24
2.4.3.2 Le blanchiment avant l'étape de flottation	27
2.4.3.3 Le blanchiment après l'étape de flottation	28
2.4.4 Les produits chimiques nécessaires pour le blanchiment	30
2.4.4.1 Le blanchiment au peroxyde d'hydrogène	30
2.4.4.2 Le blanchiment à l'hydrosulfite de sodium	34
2.4.5 Les conditions de blanchiment	37
2.5 Les propriétés optiques et colorimétriques	39
2.5.1 Le degré de blancheur	39
2.5.2 L'opacité	40
2.5.3 La mesure de la couleur	40

2.6 Caractérisation des vieux papiers	43
2.6.1 Le support	43
2.6.2 L'encre	43
2.7 Traitement statistique des résultats	45
2.7.1 Le coefficient de corrélation	45
2.7.2 La régression	46
2.7.3 Le coefficient d'explication	46
3- PROCEDURE EXPERIMENTALE	47
3.1 Plan expérimental	47
3.1.1 Les abréviations utilisées	47
3.2 La procédure de désencrage employée	48
3.2.1 Le choix de la matière première à désencrer	50
3.2.2 Le trempage du papier	50
3.2.3 La remise en pâte	50
3.2.4 L'essorage de la pâte	52
3.2.5 Le décrochage de l'encre et le blanchiment	52
3.2.6 La flottation	54
3.2.7 Le blanchiment	54
3.2.7.1 Le blanchiment au peroxyde d'hydrogène	56
3.2.7.2 Le blanchiment à l'hydrosulfite de sodium	57

3.3 Méthodes d'analyse des résultats	59
3.3.1 Les propriétés papetières	59
3.3.2 L'analyse du peroxyde résiduel	59
3.3.3 L'analyse statistique	59
4- RESULTATS ET DISCUSSION	69
4.1 Influence de la consistance de trituration et de la charge de peroxyde d'hydrogène ajouté sur les propriétés optiques et physiques du papier journal recyclé	69
4.1.1 Le blanchiment au tritrateur	69
4.1.2 La neutralisation du peroxyde	75
4.2 Comparaison des blanchiments externes au peroxyde et à l'hydrosulfite pour la pâte désencrée	78
4.3 Comparaison entre le blanchiment au tritrateur et celui à tour externe pour le peroxyde d'hydrogène	90
4.4 Comparaisons des différents coûts de blanchiment	97
5- CONCLUSION	105
6- REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	107
ANNEXE A	113
ANNEXE B	122

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier très sincèrement mon directeur monsieur Claude Daneault et mon co-directeur monsieur Lorenzo Marchildon pour leur support et leur conseil. Ils m'ont donné toute l'aide nécessaire à la réalisation de ce projet.

Je remercie madame Céline Leduc pour l'aide précieuse qu'elle m'a apporté au niveau de la préparation des séminaires et de l'expérimentation. Je remercie monsieur Bruno Chabot pour ses précieux conseils et sa constante collaboration. Je remercie également tout le personnel du Centre de recherche en pâtes et papiers pour leur constante collaboration.

RESUME

La revue de la littérature nous a permis de constater que peu de travaux ont été effectués dans le domaine du blanchiment simultané au procédé de désencrage. Les travaux qui portent sur le sujet utilisent des papiers de grades supérieurs. L'objectif de ces expériences est d'obtenir la blancheur la plus élevée possible ce qui ne peut être réalisé avec le blanchiment simultané. D'autres travaux n'utilisent que de faibles charges de peroxyde d'hydrogène pour compenser les pertes causées par l'alcalinité.

Comme l'intérêt des traitements haute consistance est encore tout récent, nous avons expérimenté le blanchiment combiné à la trituration dans le but de faciliter l'intégration de la pâte désencrée de papier journal dans une nouvelle formulation de papier journal à un prix avantageux.

L'objectif de notre travail est de démontrer qu'il est possible d'obtenir une pâte désencrée de papier journal dont les propriétés optiques égalent celles de la pâte vierge en combinant le blanchiment à la désintégration. Notre attention porte sur certains paramètres de la trituration tels que la consistance de la pâte et la charge

de peroxyde d'hydrogène ajouté. Par la suite, nous comparons le blanchiment au tritrateur à l'aide du peroxyde avec les blanchiments conventionnels au peroxyde et à l'hydrosulfite. Finalement, nous traitons de l'aspect économique de ces procédés.

Nous démontrons que l'utilisation du peroxyde lors de la trituration à haute consistance permet d'obtenir une pâte désencrée de papier journal qui se compare avantageusement avec la pâte vierge utilisée dans la fabrication du papier journal. Les résultats les plus intéressants sont obtenus avec une charge de peroxyde de 1% à une consistance de trituration de 10%. Une consistance et une charge supérieures ne sont pas justifiées par les résultats obtenus. La coordonnée b^* (teinte jaune) et l'indice de déchirure sont les deux critères qui ne rencontrent pas nos exigences.

La neutralisation du peroxyde après l'étape de trituration n'est pas souhaitable puisque celle-ci diminue la blancheur (de 1%), la luminosité (de 2%) et la longueur de rupture (de 1km).

Nous constatons que le blanchiment externe au peroxyde permet des gains de blancheur et de luminosité supérieurs au blanchiment au tritrateur (8 et 4 points de plus respectivement). Le blanchiment externe à l'hydrosulfite permet un gain

de blancheur supérieur de trois points. De plus, il permet d'abaisser la teinte jaune du papier de façon appréciable (2 points).

Du point de vue économique, le blanchiment externe à l'hydrosulfite est le plus avantageux suivi du blanchiment réalisé au tritrateur à l'aide du peroxyde.

LISTE DES TABLEAUX

page

1:	Propriétés optiques de la pâte vierge, recyclée et désencrée du journal "Le Nouvelliste" de Trois-Rivières et de la pâte vierge du "USA Today"	4
2:	Résultats de la blancheur et de la luminosité du papier journal désencré après vieillissement de l'encre offset	5
3:	Contaminants présents dans la pâte recyclée, leur gravité spécifique et leur grosseur	13
4:	Décomposition catalytique du peroxyde d'hydrogène	31
5:	Conditions théoriques du blanchiment au peroxyde d'hydrogène	37
6:	Conditions théoriques du blanchiment à l'hydrosulfite de sodium	38
7:	Composition et caractéristiques du journal régional "Le Nouvelliste" . .	43
8:	Composition conventionnelle d'encre offset	44
9:	Conditions opérationnelles et charges des produits utilisés lors du désencrage	55

10:	Conditions expérimentales et charges des produits utilisés pour le blanchiment au peroxyde d'hydrogène	58
11:	Conditions expérimentales et charges des produits utilisés pour le blanchiment à l'hydrosulfite de sodium	58
12:	Fishers partiels et coefficients de détermination multiple de chacun des termes des équations de prédictions des figures 21 à 24	63
13:	Fishers partiels et coefficients de détermination multiple de chacun des termes des équations de prédictions des figures 25 à 31	64
14:	Equations de prédiction, coefficients de détermination multiple et erreur expérimentale des figures 21 à 31	65
15:	Effet de la neutralisation du peroxyde après l'étape de trituration sur les différentes propriétés de la pâte désencrée	77
16:	Pourcentages de peroxyde résiduel lors des blanchiments au peroxyde pour les deux consistances utilisées	83
17:	Coûts unitaires des produits chimiques	98
18:	Coûts en produits chimiques et pourcentage des composants des différents blanchiments pour une même blancheur	99
19:	Coûts en produits chimiques et pourcentage des composants des différents blanchiments pour une même charge de peroxyde ou d'hydrosulfite	100

20:	Coûts d'investissement et d'opération estimés des blanchiments de la pâte désencrée pour papier journal	102
21:	Coûts des alternatives	102
22:	Coûts des deux alternatives répartis sur "n" années	103
A1:	Valeurs des coefficients de corrélation r	116
A2:	Table de variance du programme d'analyse statistique	117
A3:	Distribution du rapport de variance F ($\alpha=5\%$)	117
B1:	Conditions et résultats expérimentaux du blanchiment de la pâte désencrée au tritrateur avec 1% de peroxyde (première série)	123
B2:	Conditions et résultats expérimentaux du blanchiment de la pâte désencrée au tritrateur avec 2% de peroxyde (première série)	124
B3:	Conditions et résultats expérimentaux du blanchiment de la pâte désencrée au tritrateur avec 1% de peroxyde (deuxième série)	125
B4:	Conditions et résultats expérimentaux du blanchiment de la pâte désencrée au tritrateur avec 2% de peroxyde (deuxième série)	126

B5: Conditions expérimentales de la pâte désencrée qui sera blanchie en un stage dans une tour externe à l'aide du peroxyde et de l'hydrosulfite	127
B6: Conditions et résultats expérimentaux du blanchiment externe au peroxyde de la pâte désencrée (première série)	128
B7: Conditions et résultats expérimentaux du blanchiment externe au peroxyde de la pâte désencrée (deuxième série)	129
B8: Conditions et résultats expérimentaux du blanchiment externe à l'hydrosulfite de la pâte désencrée (première et deuxième séries)	130
B9: Conditions et résultats expérimentaux du blanchiment de la pâte désencrée au tritrateur à 10% de consistance avec 1 et 2% de peroxyde (première et deuxième séries)	131

LISTE DES FIGURES

	page
1: Système de désencrage moderne	8
2: Décrochage de l'encre de la surface du papier	9
3: Elimination de l'encre de la suspension fibreuse	9
4: Consistance de la pâte en relation avec la blancheur lors de la trituration	11
5: Ajout de dispersant à l'étape de lavage en fonction des résultats de blancheur	16
6: Cellule de flottation représentant le fonctionnement du procédé de flottation	16
7: Ajout de dispersant et de collecteur à la cellule de flottation en relation avec la blancheur	18
8: Saponification des encres	18
9: Points d'addition des agents de blanchiment pour la pâte désencrée .	25
10: Blanchiment réalisé au tritrateur à l'aide du peroxyde d'hydrogène . .	26
11: Blanchiment intermédiaire entre l'étape de trituration et de flottation . .	28

12:	Blanchiment externe réalisé après le cycle de désencrage	29
13:	Effet stabilisant du sulfate de magnésium et du silicate de sodium sur le peroxyde d'hydrogène	33
14:	Elimination de la couleur par réduction des chromophores de la lignine à l'aide de l'hydrosulfite de sodium	35
15:	Elimination de la couleur par oxydation des chromophores de la lignine à l'aide du peroxyde d'hydrogène	36
16:	Coordonnées de couleur L*, a*, b* (CIE Lab)	42
17:	Séquence expérimentale	49
18:	Schéma du triturateur de laboratoire	51
19:	Schéma du mélangeur utilisé pour le décrochage de l'encre et le blanchiment	53
20:	Schéma de la cellule de flottation de laboratoire (Voith)	55
21:	Blancheur du papier en relation avec la consistance de trituration pour différentes charges de peroxyde d'hydrogène	70
22:	Luminosité (L*) du papier en relation avec la consistance de trituration pour différentes charges de peroxyde d'hydrogène	72
23:	Teinte jaune (coordonnée b*) du papier en relation avec la consistance de trituration pour différentes charges de peroxyde d'hydrogène	73

24:	Pourcentage de peroxyde consommé en relation avec la consistance de trituration pour différentes charges de peroxyde d'hydrogène	76
25:	Blancheur du papier en relation avec la concentration des agents de blanchiment utilisés à la tour externe	79
26:	Luminosité (L^*) du papier en relation avec la concentration des agents de blanchiment utilisés à la tour externe	81
27:	Teinte jaune (coordonnée b^*) du papier en relation avec la concentration des agents de blanchiment utilisés à la tour externe . . .	82
28:	Opacité du papier en relation avec la concentration des agents de blanchiment utilisés à la tour externe	85
29:	Longueur de rupture du papier en relation avec la concentration des agents de blanchiment utilisés à la tour externe	86
30:	Indice de déchirure du papier en relation avec la concentration des agents de blanchiment utilisés à la tour externe	88
31:	Indice d'éclatement du papier en relation avec la concentration des agents de blanchiment utilisés à la tour externe	89
32:	Effet du point d'addition du peroxyde sur la blancheur du papier	91
33:	Effet du point d'addition du peroxyde sur la luminosité (L^*) du papier .	91
34:	Effet du point d'addition du peroxyde sur la teinte jaune (coordonnée b^*) du papier	93

35: Effet du point d'addition du peroxyde sur l'opacité du papier	93
36: Effet du point d'addition du peroxyde sur la longueur de rupture du papier	95
37: Effet du point d'addition du peroxyde sur l'indice de déchirure du papier	95
38: Effet du point d'addition du peroxyde sur l'indice d'éclatement du papier	96

1- INTRODUCTION

Depuis quelques années, la récupération et le recyclage des vieux papiers augmentent partout dans le monde. En effet, les problèmes d'enfouissement que connaissent les grands centres urbains, l'épuisement et/ou la perte de qualité des ressources forestières, et les problèmes de pollution contribuent à favoriser l'utilisation de la fibre secondaire.

Plusieurs états américains adoptent des lois vis-à-vis l'enfouissement des déchets. L'application de ces lois américaines se répercutent dans le secteur papetier. C'est alors qu'une nouvelle législation, stipulant la teneur en fibre secondaire pour la fabrication du papier journal, voit le jour. Le Canada suivra le mouvement. Ainsi, un producteur qui souhaite vendre son papier journal aux Etats-Unis devra respecter les exigences en contenu de fibres recyclées.

Au Québec, le quart de ce qui compose nos déchets domestiques est constitué de vieux papiers ou de cartons (1). La récupération de cette partie diminuera les quantités de rebuts à enfouir. Le papier journal représente 8% en volume de cette fraction. Cependant, plus souvent qu'autrement, il est à nouveau utilisé dans des grades inférieurs (couche interne du carton) car il ne rencontre pas les propriétés

optiques requises après une séquence de désencrage normale. Pour remédier à cette situation, il est possible de procéder au blanchiment après le cycle de désencrage. Cette pratique s'avère efficace pour obtenir des blancheurs supérieures à 70% mais dispendieuse pour une pâte qui sera utilisée pour la fabrication du papier journal.

Traditionnellement, le papier journal était constitué de pâtes mécanique (75%) et chimique (25%). Depuis les vingt dernières années, les pâtes thermomécanique (TMP) et chimicothermomécanique (CTMP) ont remplacé ces dernières. De plus, les producteurs de papier journal ont tendance à éliminer la pâte chimique des formulations. Plus récemment, la pâte désencrée a fait son apparition pour remplacer le contenu en pâte mécanique dans des proportions de 25 à 100%

.

L'objectif de notre étude est d'accroître le niveau de blancheur de la pâte désencrée de papier journal et de minimiser son coût de production. Pour atteindre notre objectif, nous préconisons le blanchiment de la pâte au tritrateur avec le peroxyde d'hydrogène.

2- REVUE DE LA LITTERATURE

2.1 La fibre désencrée de papier Journal

2.1.1 Pourquoi désencrer le papier Journal

Dans le passé, les compagnies papetières offraient aux consommateurs des produits dont la qualité était bien supérieure aux besoins réels puisqu'elles disposaient d'une imposante réserve de matière ligneuse de grande qualité. Aujourd'hui, ces réserves ont diminué. Les compagnies papetières américaines et canadiennes doivent envisager le recyclage afin de respecter les exigences environnementales. La pâte recyclée offre une alternative économique aux fibres vierges et sera une composante des diverses formulations de papiers pour les prochaines années. Cependant, il faut procéder au désencrage pour produire des papiers dont les propriétés optiques respectent les besoins. Le tableau 1 montre les propriétés optiques de la pâte vierge, de la pâte recyclée et de la pâte désencrée du journal "Le Nouvelliste" de Trois-Rivières. Bien que nous utilisons ce journal comme référence, nous devons à plus ou moins long terme adopter les critères (blancheur et couleurs) du journal "USA Today" comme norme. On constate que la présence de l'encre affecte beaucoup ces propriétés (vierge vs recyclée). Le désencrage bien qu'il améliore les résultats, ne permet pas d'obtenir

les propriétés de la pâte vierge (4-6). De plus, le désencrage du papier journal produit une pâte d'une teinte grisâtre causé par l'alcalinité (7,8). Il faut donc désencrer le papier journal dans des conditions particulières afin que ces propriétés optiques égalent celles de la pâte vierge, ce qui favorisera son intégration dans une nouvelle formulation de papier journal.

Tableau 1: Propriétés optiques de la pâte vierge, recyclée et désencrée du journal "Le Nouvelliste" de Trois-Rivières et de la pâte vierge du "USA Today"

Quotidiens	Le Nouvelliste			USA Today
Propriétés	pâte vierge	pâte recyclée	pâte désencrée	la norme
Blancheur ISO (%)	59.6	53.5	56.4	59.0
L* (noir-blanc) (%)	84.02	79.80	82.35	83.30
a* (vert-rouge)	-0.12	-1.92	0.20	1.10
b* (jaune-bleu)	5.24	3.79	6.72	4.30

L'utilisation de la pâte désencrée de papier journal dans de nouvelles formulations de papier conduira à une meilleure utilisation de la fibre vierge. Cette fibre de grande qualité sera utilisée majoritairement dans des grades supérieurs à plus haute valeur ajoutée.

En général, l'utilisation de la fibre désencrée dans un papier améliore son opacité, donne une meilleure stabilité dimensionnelle, une meilleure formation de la feuille et une diminution du peluchage. En contrepartie, la résistance de ce papier est parfois trop faible et de blancheur insuffisante. Sans oublier que la pâte désencrée peut conduire au ralentissement de la machine à cause de son faible égouttage (9).

Il est important de considérer qu'aujourd'hui la majorité des grands quotidiens sont tirés en lithographie offset. Ces papiers se désencrent mieux lorsque le vieillissement est inférieur à trois mois. Le tableau 2 (10) montre l'évolution de la blancheur et de la luminosité du journal désencré après un vieillissement de l'encre offset. Les résultats diffèrent selon la formulation de l'encre offset (A, B, C) utilisée.

Tableau 2: Résultats de la blancheur et de la luminosité du papier journal désencré après vieillissement de l'encre offset

Caractéristiques	Blancheur ISO (%)			Luminosité (%)		
	1 jour	3 mois	5 mois	1 jour	3 mois	5 mois
Encre A	56.5	54.4	51.3	67.8	64.6	61.0
Encre B	54.5	53.6	52.1	66.6	64.5	63.0
Encre C	55.1	54.4	54.4	66.5	66.1	65.1

2.1.2 L'évolution du désencrage

Le désencrage n'est pas une technologie nouvelle. La première tentative de désencrage fut réalisée par Georges Baltazar Illy en 1695. Une centaine d'années plus tard, Matthias Koops obtient le 28 avril 1800 un brevet britannique sur le sujet (11). Toutefois, son procédé connu un succès mitigé au niveau commercial puisque la production de papier n'était pas importante et que les équipements étaient déficients (12). De plus, le désencrage n'était pas une nécessité.

Au milieu du 19^e siècle, l'invention de la machine Fourdrinier révolutionna l'industrie des pâtes et papiers. Le recyclage industriel devint donc rentable puisque les volumes de papiers augmentèrent. La technologie de Koops (désencrage par lavage) refit surface. Les Américains utilisèrent principalement cette technique jusqu'au milieu des années soixante-dix (6).

Dans les années 1932-1936, Kowalewski développa le procédé par flottation. Cette technologie dérive de celle utilisée pour le traitement des minéraux. Les Européens confrontés à des lois environnementales très strictes, se tournèrent vers le procédé de flottation. Depuis 1978, la flottation connaît une nette progression par rapport au lavage partout dans le monde.

Aujourd'hui, plusieurs systèmes combinent la flottation et le lavage lorsqu'une blancheur élevée (75% et plus) et une grande propreté sont nécessaires.

2.2 Les opérations fondamentales du désencrage

Une utilisation croissante des pâtes recyclées, due aussi bien à des raisons économiques (coûts) qu'écologique (élimination et recyclage des déchets), nécessite une amélioration de leur qualité.

Le désencrage permet d'éliminer de la suspension fibreuse l'encre déposée à la surface du papier au cours de l'impression pour produire une pâte propre et des papiers d'une qualité visuelle comparable à ceux obtenus avec des fibres vierges. Pour réaliser un bon désencrage, plusieurs opérations sont nécessaires. La figure 1 (13) présente l'organigramme d'un système de désencrage moderne. Le processus peut cependant se simplifier en deux phases (5). La première est le décrochage de l'encre de la surface du papier (figure 2). La seconde est l'élimination de l'encre de la suspension fibreuse (figure 3) (14).

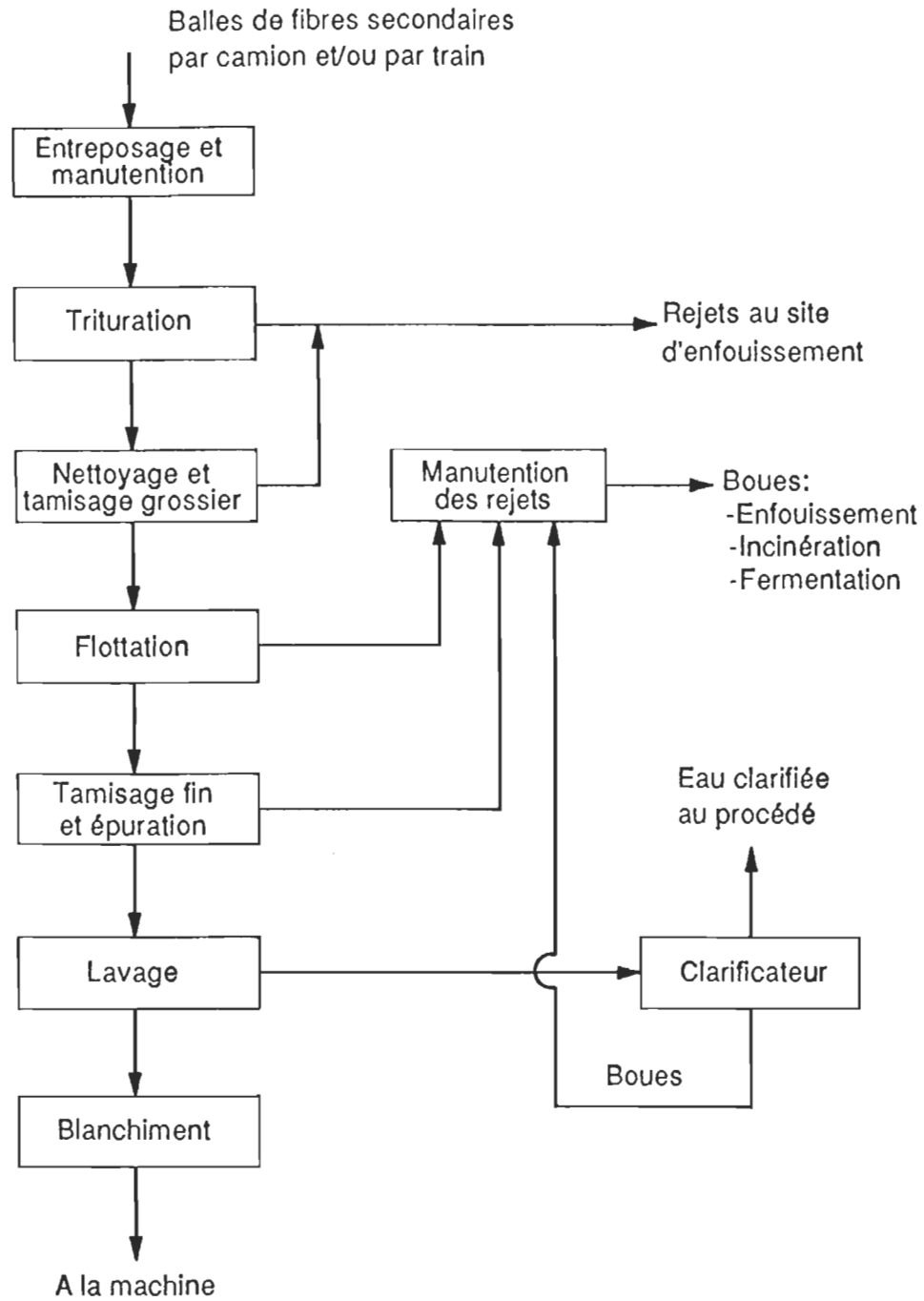


Figure 1: Système de désencrage moderne

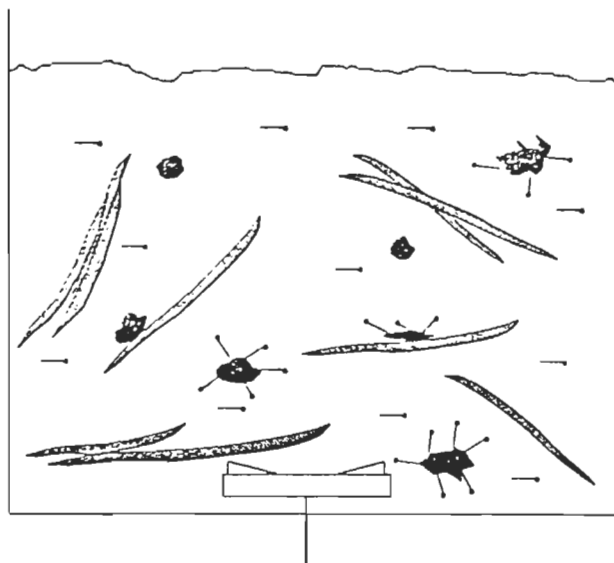


Figure 2: Décrochage de l'encre de la surface du papier

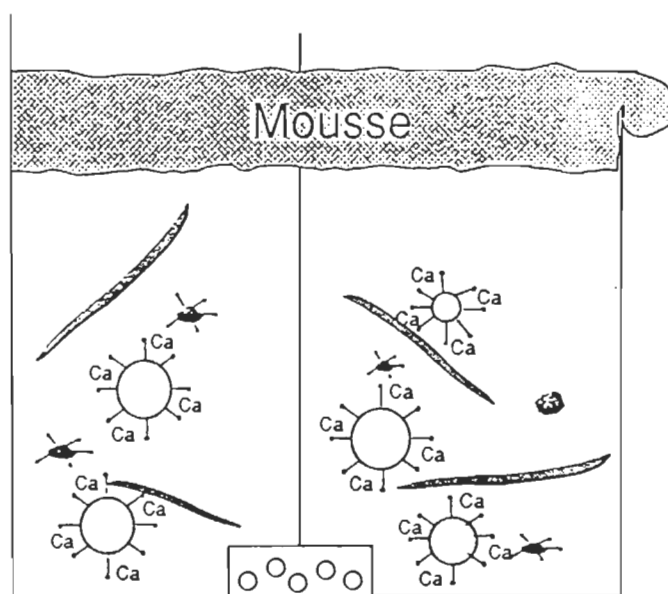


Figure 3: Elimination de l'encre de la suspension fibreuse

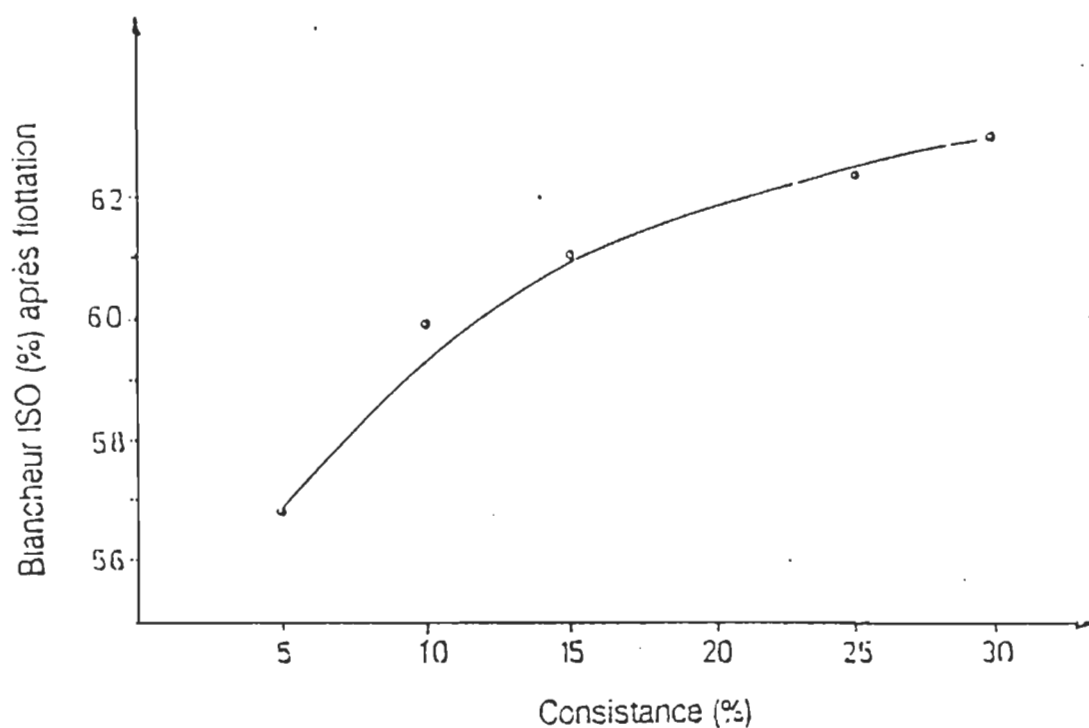
2.2.1 Le décrochage de l'encre

Le décrochage s'effectue à la première phase du procédé lors de la mise en pâte ou de la séparation des constituants dans le tritrateur. Les actions mécaniques (battage, coupure, cisaillement et frottement fibre-à-fibre), chimiques (saponification des liants des encres) et physico-chimiques (action des détergents et des collecteurs) conduisent au décrochage (6). L'efficacité du décrochage de l'encre dépend en particulier des paramètres suivants:

- la quantité des produits chimiques
- la nature des produits chimiques
- la température
- la consistance
- le temps de contact

Egalement, il ne faut pas oublier que la pénétration de l'encre dans la feuille de papier, sa modification lors du séchage et son accrochage sur la fibre avec plus ou moins de force de cohésion dépendent de la nature de celle-ci. Par conséquent, elle affecte la qualité du décrochage (15). Depuis quelques années, la trituration haute consistance (15%) prouve sa supériorité sur la basse consistance (2%) (16,17). Les principaux avantages de ces tritrateurs à haute

consistance sont: une consommation plus faible d'énergie; une durée réduite de mise en pâte et une meilleure dispersion des particules d'encre ce qui se traduit en bout de ligne par une augmentation de la blancheur (18) tel que le présente la figure 4 (19,20).



Vieux papiers: journal/périodique = 1/1

Formule de désencrage avec 1% de peroxyde d'hydrogène

Figure 4: Consistance de la pâte en relation avec la blancheur lors de la trituration

2.2.2 L'élimination de l'encre

Lors de la trituration, le papier se sépare en différents constituants: fibres, charges, encres et contaminants. Ces constituants possèdent différentes caractéristiques (forme, longueur, densité, mouillabilité) qui seront utilisées pour permettre leur séparation (21). Le tableau 3 (22) montre les différents contaminants que l'on retrouve dans la pâte recyclée, leur gravité spécifique et leur dimension. Il est évident que pour produire une pâte de bonne qualité, nous devons éliminer l'encre et les autres impuretés de la suspension. Plusieurs étapes (épuration, tamisage, nettoyage) sont nécessaires pour éliminer ces contaminants. L'encre peut être éliminée par deux techniques qui se différencient par leur mode d'opération. Ce sont les techniques de lavage et de flottation.

2.2.2.1 La technique de lavage

Les différences géométriques (forme, longueur, etc...) des constituants sont à la base du principe d'élimination de l'encre par la technique de lavage (23). Elle consiste au tamisage de la suspension de pâte sur un tamis aux mailles appropriées. Les fibres d'un diamètre moyen de l'ordre de 0.5 à 1 mm sont retenues sur la toile et les particules d'encre beaucoup plus petites (inférieures à 100 μ), les fines et les charges sont entraînées avec l'eau.

Un système à trois ou quatre étapes de lavage est nécessaire pour obtenir une pâte bien désencrée (23). Le procédé par lavage est plus efficace pour des

Tableau 3: Contaminants présents dans la pâte recyclée, leur gravité spécifique et leur grosseur

Type	Gravité spécifique	Dimension des particules
Sable	2.0-2.2	2, 3, 4
Métal	6-9	5
Glaise	1.8-2.6	2
Cire	0.9-1.0	1, 2
Polyéthylène	0.91-0.97	4, 5
Polystyrène expansé	0.3-0.5	4, 5
Polystyrène	1.04-1.10	4, 5
Latex/caoutchouc	0.9-1.1	3, 4
Produits thermofusibles	0.95-1.10	3, 4
Colle	0.9-1.1	3
Asphalte	1.1-1.5	2, 3
Encre	1.2-1.6	1, 2, 3
<u>Dimension des particules</u> 1- partiellement dissoutes 2- moins de 40 microns 3- 40-400 microns 4- 400-4000 microns 5- plus de 4000 microns		

particules d'encre de dimensions inférieures à 15μ (24) tandis que le procédé par flottation donne de meilleurs résultats pour des particules d'encre de $10-100\mu$ (24). Le lavage peut se faire entre 1 et 4% de consistance. La figure 5 montre que l'ajout de dispersant améliore les résultats du lavage (25).

2.2.2.2 La technique de flottation

La technique de la flottation dérive du traitement des minerais. Son principe d'élimination (23) d'encre est basé sur:

A) Les propriétés physiques:

- 1) Dimensions des particules
- 2) Dimensions des bulles d'air
- 3) Consistance
- 4) Température

B) Les propriétés physico-chimiques superficielles:

- 1) Mouillabilité
- 2) Tension à l'interface

C) Les propriétés chimiques:

- 1) Dureté de l'eau
- 2) pH
- 3) Agents collecteurs
- 4) Agents moussants

La technologie des cellules de désencrage a beaucoup évolué au cours de ces dernières années. Pour effectuer une bonne élimination de l'encre on doit:

- Introduire de l'air dans la pâte
- Fixer les particules d'encre aux bulles d'air
- Séparer les bulles et la pâte

Après l'étape de trituration, la suspension est diluée et on ajoute des produits chimiques. Cette suspension est alors dirigée vers une cellule de flottation. Les bulles d'air injectées dans la cellule entraînent les particules d'encre à la surface où elles se concentrent sous forme de mousse noirâtre. La mousse est raclée et dirigée vers la sortie des rejets. L'accepté de la flottation est récupéré et servira ultérieurement. La figure 6 présente une cellule de flottation Voith.

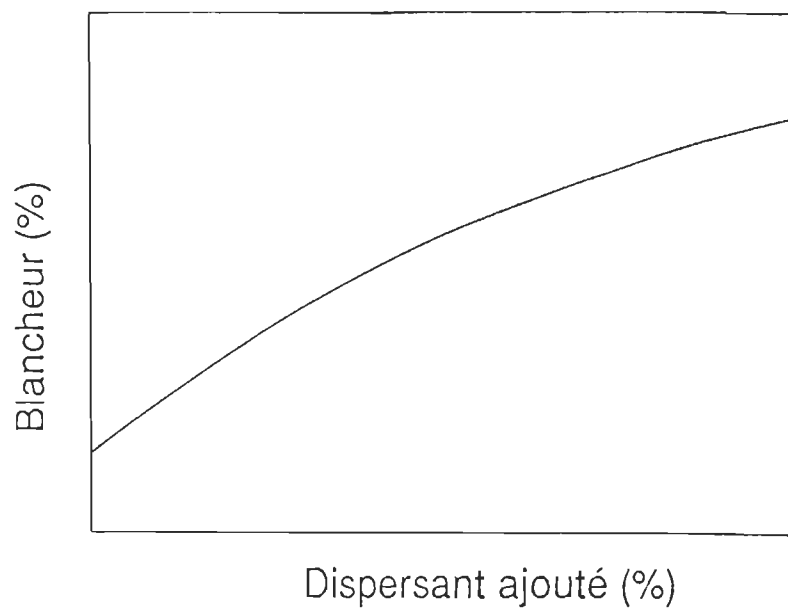


Figure 5: Ajout de dispersant à l'étape de lavage en fonction des résultats de blancheur

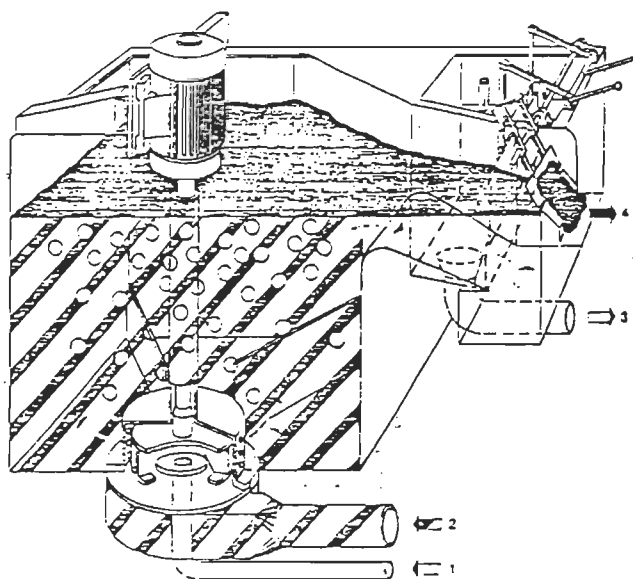


Figure 6: Cellule de flottation représentant le fonctionnement du procédé de flottation

Le procédé par flottation possède un rendement massique de l'ordre de 85 à 95% et il est fonction du type de papier que nous souhaitons désencrer (26). La figure 7 montre que les résultats de désencrage sont affectés par le surfactant et le collecteur ceux-ci jouant un rôle sur la grosseur des particules (25). Le procédé par lavage donne un rendement inférieur car il élimine une grande partie des fines et des charges. Le procédé par flottation consomme 10 à 20 fois moins d'eau par tonne de pâte que le procédé par lavage (27,28). Pour notre expérimentation, on utilise la technologie de la flottation.

2.3 Les produits chimiques utilisés pour le désencrage

Plusieurs produits chimiques peuvent être utilisés dans le désencrage. Chaque installation de désencrage a sa propre formulation selon ses besoins. A l'intérieur des prochaines sections, nous décrirons les produits employés et les raisons de leur utilisation.

2.3.1 L'hydroxyde de sodium (NaOH)

L'alcalinité, créé par l'hydroxyde de sodium, conduit au gonflement des fibres et à l'ouverture des fibrilles. La figure 8 montre la destruction du liant des encres à l'aide de l'hydroxyde de sodium (huiles, résines) par saponification (29).

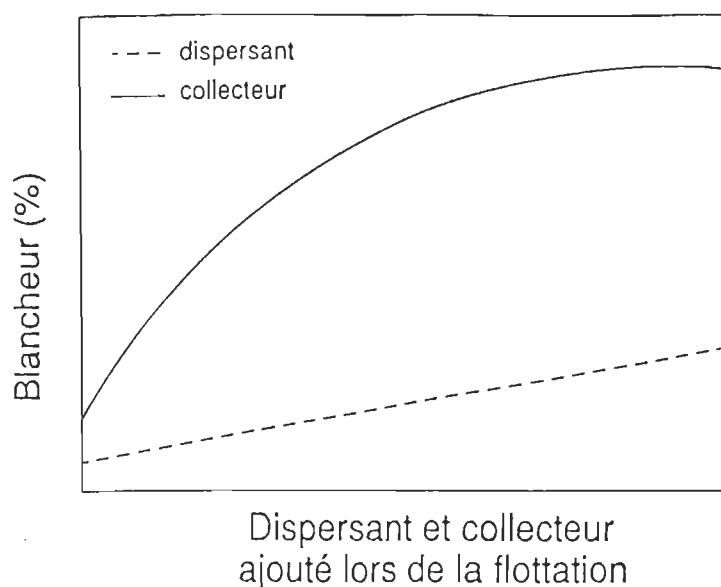


Figure 7: Ajout de dispersant et de collecteur à la cellule de flottation en relation avec la blancheur

SAPONIFICATION

Définition: Hydrolyse

- des esters
- des autres composés

Hydrolyse d'un ester par \Rightarrow Sel + Alcool

une base inorganique

$$R-COOR + NaOH \rightarrow R-COONa + R-OH$$

ex. ester + soude savon + glycérol
 (huile végétale)

Figure 8: Saponification des encres

Le pH contrôle les espèces chimiques en solution. De plus, l'alcali a une action positive lors du blanchiment au peroxyde d'hydrogène.

Cependant, la quantité d'hydroxyde de sodium (0 à 2%) doit être déterminée judicieusement sinon il y a noircissement de la pâte. C'est au tritrateur que l'hydroxyde de sodium est ajouté. Le pH utilisé à la trituration se situe entre 10 et 11 (23,30).

2.3.2 Le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2)

Le peroxyde d'hydrogène est un des agents de blanchiment les plus utilisés pour la pâte mécanique parce qu'il blanchit sans diminuer le rendement de la pâte (31). La pâte désencrée de papier journal étant constituée en grande partie de pâte mécanique, le peroxyde est fréquemment utilisé au tritrateur. De plus, certaines conditions de blanchiment favorisent son utilisation (32-34).

Le peroxyde aide au décrochage des particules d'encre (7,35) et empêche le jaunissement des pâtes mécaniques en milieu alcalin. Il permet également d'améliorer le degré de blancheur (36,37). Il existe deux théories en ce qui touche l'action du peroxyde. Selon la première théorie, la formation des groupements chromophoriques colorés est inhibée. Selon la deuxième théorie, ces

groupements sont formés et par la suite oxydés les rendant moins colorés (38). Des quantités de peroxyde de l'ordre de 0.2 à 1% par rapport à la pâte sèche sont couramment utilisées au tritrateur.

2.3.3 Le silicate de sodium (Na_2SiO_3)

Le silicate de sodium est une source d'alcali; lequel joue comme un tampon. Le remplacement d'une fraction d'hydroxyde de sodium par le silicate de sodium est bénéfique quand la pâte recyclée contient une bonne quantité de fibres mécaniques (39). Les autres fonctions du silicate de sodium sont (7,38):

- De stabiliser le peroxyde
- De disperser et d'émulsifier le liant des encres
- De favoriser le passage en suspension des particules

Le silicate de sodium cause des problèmes sur la machine à papier (40). Il réagit avec le calcium et le magnésium pour former des sels insolubles. Il forme aussi des couches sur les fibres, les équipements et les feutres (41). Le silicate tend à augmenter la consommation de l'alun et affecte la rétention des charges et des pigments (42).

2.3.4 Le chlorure de calcium (CaCl_2)

Le chlorure de calcium est habituellement ajouté juste avant la flottation lorsque des acides gras sont employés comme surfactant. La présence de chlorure de calcium n'est pas nécessaire si des détergents synthétiques sont utilisés. Le chlorure de calcium fournit une dureté additionnelle à l'eau qui transforme le caractère des micelles d'encre hydrophilique en hydrophobique. L'excès de savon se fixe (en solution dans la cellule de flottation) sur les bulles d'air créant des sites actifs pour l'adsorption des particules d'encre (43). Une dureté de 150 à 200ppm de carbonate de calcium (CaCO_3) est généralement utilisée lors de la flottation (44,45). Une trop grande charge de chlorure de calcium peut entraîner des problèmes de dépôts sur la machine.

2.3.5 Les surfactants

Les surfactants ont pour fonction de diminuer la tension de surface de l'eau et de faciliter le mouillage des vieux papiers. Ils réduisent la liaison entre l'encre et la fibre (34). Ils ont une fonction de dispersion de l'encre au tritrateur et de collecteur à la flottation. Prenons l'exemple de l'acide oléique que nous utilisons dans notre étude. Il déstabilise la dispersion de l'encre et permet aux particules d'encre de s'attacher aux bulles d'air dans la cellule de flottation et d'être éliminées

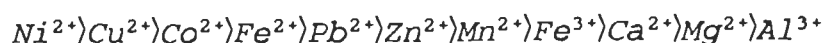
à la surface. Ce savon d'acide gras a aussi les caractéristiques d'un agent moussant. La quantité d'acide oléique qui n'a pas réagi avec les ions calcium forme de la mousse qui contient les particules d'encre.

Ce type de savon ajouté au tritrateur aide au décrochage de l'encre (44). L'acide oléique est à la fois un agent moussant, un agent collecteur et un agent dispersant.

2.3.6 Les séquestrants

Les séquestrants sont utilisés pour neutraliser les ions métalliques en formant des complexes qui empêchent la décomposition du peroxyde (46). Ces ions sont présents dans les fibres, dans l'eau et dans les encres (4). Ces séquestrants sont utilisés comme prétraitement de la pâte avant l'étape de blanchiment et donnent de meilleurs résultats à de faibles consistances (3% environ). Le diéthylène triamine penta acétate de sodium (DTPA) est le produit que nous utilisons dans notre expérimentation. Ce produit est ajouté au tritrateur si et seulement si le peroxyde d'hydrogène est utilisé dans le procédé de désencrage.

Il est sélectif envers certains ions comparativement au silicate. A pH 10 (38), l'ordre de sélectivité est:



2.4 Le blanchiment de la pâte désencrée de papier journal

2.4.1 Pourquoi blanchir la pâte désencrée de papier journal

Comme le désencrage ne permet pas d'obtenir une pâte ayant les mêmes propriétés optiques et colorimétriques que la pâte vierge, il est nécessaire de procéder à son blanchiment afin de réutiliser cette pâte dans la fabrication du papier journal. Il faut bien admettre que si le blanchiment des pâtes vierges est un phénomène bien connu, la transposition aux fibres recyclées s'avère très délicate. Des différences au niveau de la fibre, la présence d'encre et l'effet de jaunissement causé par le milieu alcalin font que la pâte recyclée à un comportement différent au blanchiment (26,34).

2.4.2 Les agents de blanchiment

Les agents de blanchiment utilisés diffèrent selon qu'ils s'agissent d'une pâte mécanique ou chimique. Le papier journal étant constitué en grande partie de pâte mécanique, nos essais de blanchiment ont été effectués avec le peroxyde d'hydrogène et l'hydrosulfite de sodium (47,48). Cependant, la pâte désencrée ne répond pas aussi bien au blanchiment que la pâte vierge (49-51).

2.4.3 Le point d'addition de l'agent blanchissant

La pâte désencrée de papier journal peut être blanchie en trois points principaux tel que l'illustre la figure 9. Les facteurs importants dans la prise de décision sont l'agent de blanchiment utilisé, les contraintes opérationnelles et le produit à blanchir.

2.4.3.1 Blanchiment simultané au cycle de désencrage

Ce blanchiment est effectué à l'aide du peroxyde d'hydrogène et prend place en même temps que le décrochage de l'encre: c'est-à-dire au tritrateur (figure 10). L'emploi du peroxyde au tritrateur permet d'enrayer le jaunissement habituel sous des conditions alcalines et d'augmenter la blancheur de la pâte (52). Son ajout

facilite de plus le décrochage des encres en oxydant leurs liants (4,53). Selon Vautier et Bever (54), le triturateur est un bon compromis existant en usine pour ajouter le peroxyde. Le peroxyde est un agent de blanchiment idéal pour la pâte désencrée puisqu'il agit sous des conditions alcalines et qu'il ne réduit pas le rendement de la pâte. Cette pratique est bénéfique lorsque les vieux papiers contiennent une grande proportion de pâte mécanique (33,34).

Selon Eul et Süss (19), il n'est définitivement pas économique d'utiliser une étape de blanchiment après traitement uniquement pour compenser les défauts des étapes de désencrage.

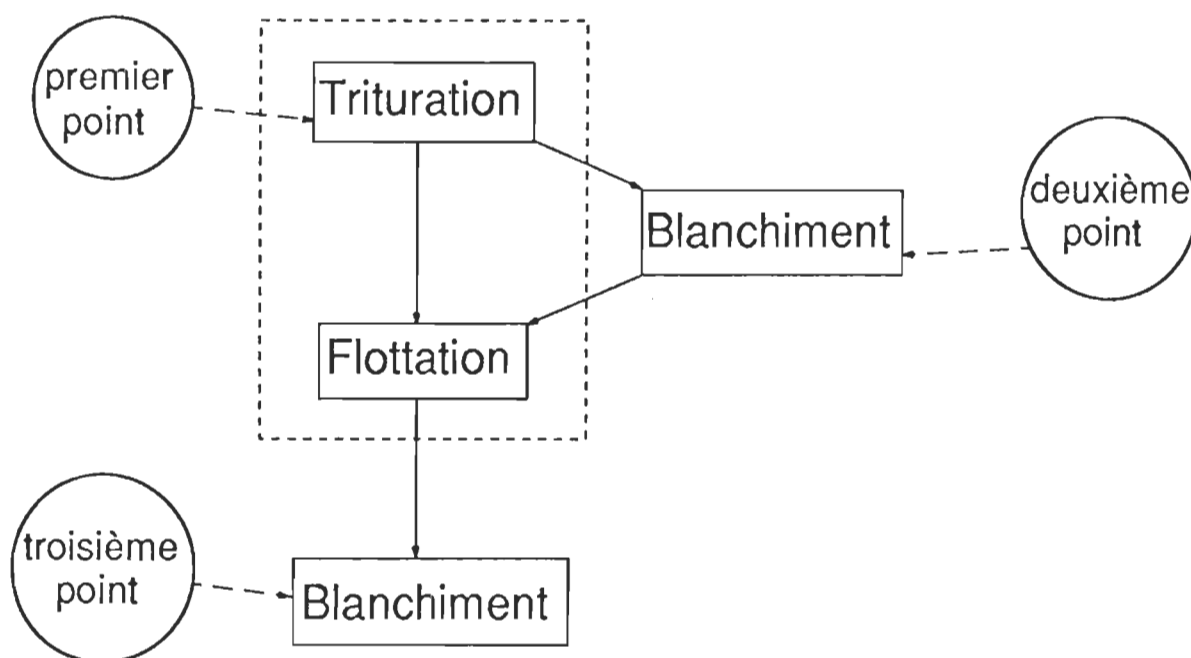


Figure 9: Points d'addition des agents de blanchiment pour la pâte désencrée

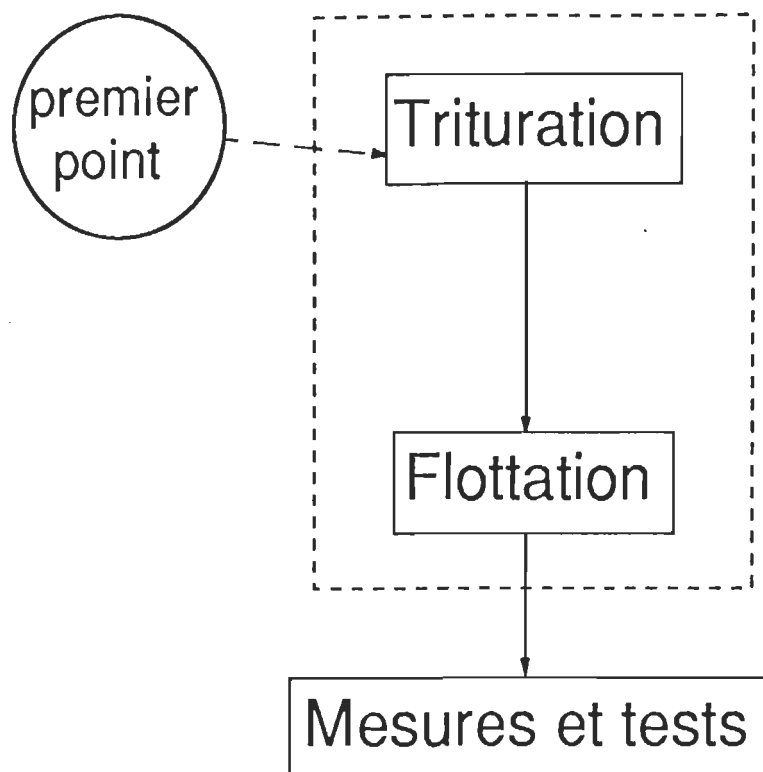


Figure 10: Blanchiment réalisé au tritrateur à l'aide du peroxyde d'hydrogène

L'absence de peroxyde au tritrateur affecte les teintes de la pâte qui ne pourront être modifiées par un blanchiment subséquent au peroxyde (33). En contre-partie, pour une quantité de peroxyde équivalente, le blanchiment externe après désencrage montre des résultats supérieurs à ceux du blanchiment simultané puisqu'une quantité du peroxyde est consommé par l'encre (18,53). Le grand nombre d'impuretés dans la pâte n'est pas favorable à la stabilisation du peroxyde lorsque le blanchiment est réalisé au tritrateur (4).

2.4.3.2 Le blanchiment avant l'étape de flottation

Le blanchiment est effectué avec le peroxyde d'hydrogène et prend place entre l'étape de trituration et celle de la flottation (figure 11). Comme il s'agit d'un blanchiment externe, les conditions peuvent être plus facilement sélectionnées pour optimiser le blanchiment comparativement à celui réalisé au triturateur. Les expériences de Bovin (53) montrent que les résultats de blancheur de la pâte blanchie avant la flottation sont similaires à ceux obtenus lors du blanchiment simultané au cycle de désencrage pour des charges de peroxyde de 1%. L'étude de Carmichael (7) indique que les différences de blancheur s'amplifient pour des charges supérieures à 1%. Ce type de blanchiment est obtenu par une étape supplémentaire et implique un investissement supplémentaire sans pour autant obtenir un gain de blancheur supérieur avec des charges de 1% de peroxyde.

Le blanchiment à l'hydrosulfite de sodium n'est pas envisagé à cet endroit puisqu'il nous oblige à passer d'un pH alcalin (trituration) vers un pH acide (blanchiment) pour ensuite revenir à un pH alcalin (flottation): ce qui n'est pas avantageux.

Le blanchiment avant l'étape de flottation n'a pas été retenu dans notre planification expérimentale puisque celui-ci n'apporte aucun avantage sur le blanchiment après l'étape de flottation (coûts, propriétés).

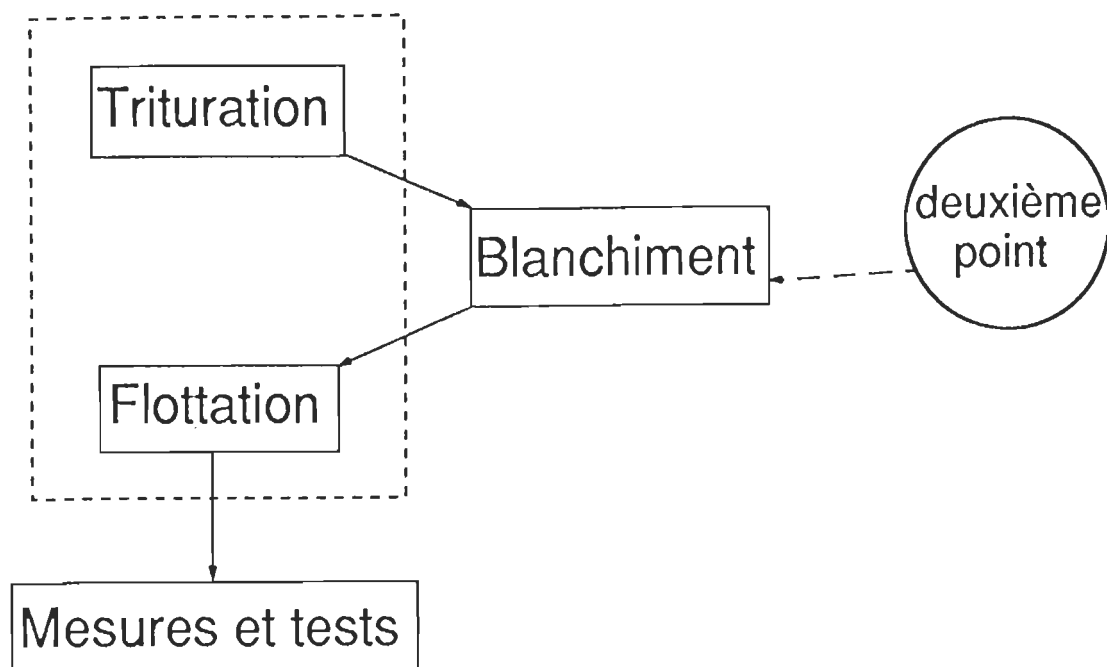


Figure 11: Blanchiment intermédiaire entre l'étape de trituration et de flottation

2.4.3.3 Le blanchiment après l'étape de flottation

Ce blanchiment (figure 12) peut être réalisé avec le peroxyde d'hydrogène ou l'hydrosulfite de sodium. Le choix de l'agent de blanchiment est fait en fonction des coûts de blanchiment et des gains possibles ou désirées (55,56). La réponse

du blanchiment après l'étape de flottation est supérieure au deux autres puisque l'encre est éliminée de la pâte en ce point (49,53).

Selon Dodson et Dean (49), lorsqu'une augmentation de seulement 6 à 7 points de blancheur sont requis, l'hydrosulfite est préférable au peroxyde puisque les coûts en produits chimiques et en capitaux sont de moindres importances. De plus, il semble que le blanchiment à l'hydrosulfite est moins affecté par l'encre résiduaire que le blanchiment au peroxyde (49).

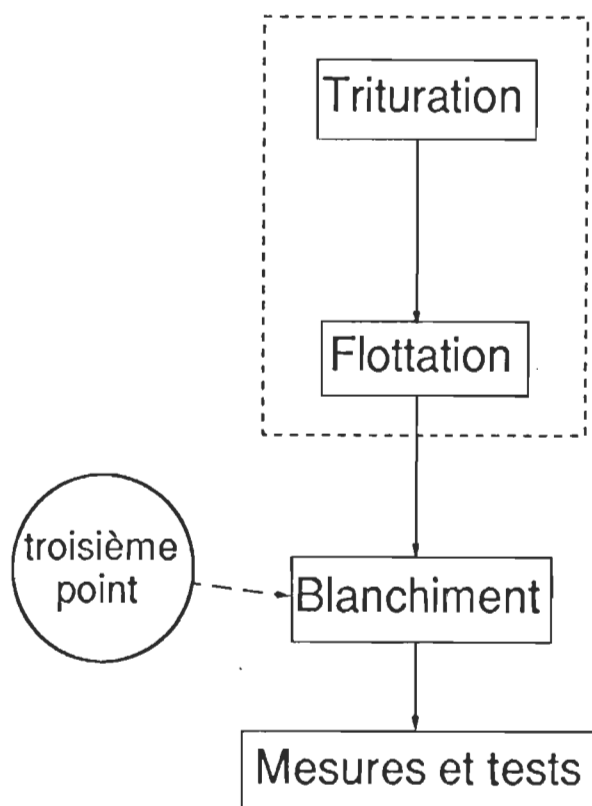


Figure 12: Blanchiment externe réalisé après le cycle de désencrage

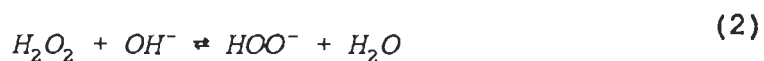
2.4.4 Les produits chimiques nécessaires pour le blanchiment

2.4.4.1 Le blanchiment au peroxyde d'hydrogène

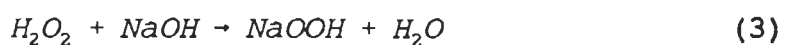
L'activité du peroxyde d'hydrogène comme agent de blanchiment est basée sur son pouvoir oxydant (57). Bien que le mécanisme de blanchiment du peroxyde ne soit pas entièrement compris, il est généralement accepté que l'ion perhydroxyle (HOO^\cdot) est l'agent actif lors du blanchiment (58).



Il est possible de favoriser la formation d'ions perhydroxyles en augmentant le niveau du pH par l'addition de soude caustique (56):

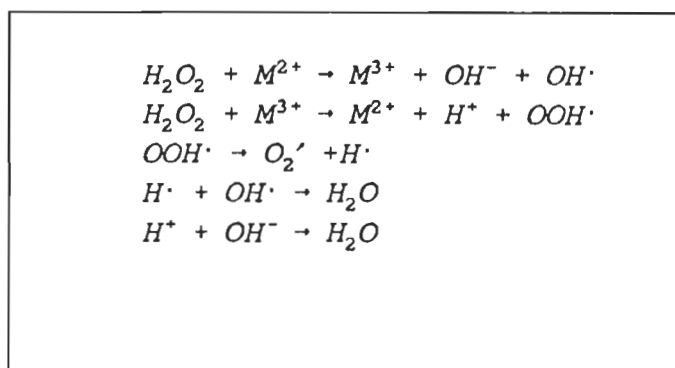


Cependant, l'alcalinité doit être limitée puisque le peroxyde a tendance à se décomposer pour former de l'oxygène:



Cette décomposition est normalement catalysée par certains ions métalliques, notamment le manganèse (59). Le tableau 4 montre les mécanismes de décomposition proposés dans la littérature (60,61). Il est possible que plus d'un mécanisme soit en fonction pendant le blanchiment (62). La production d'oxygène développe un noircissement de la pâte lors du blanchiment (57).

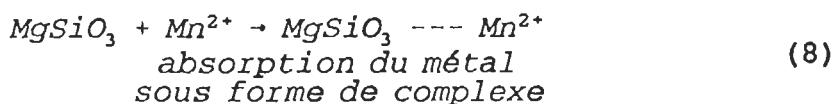
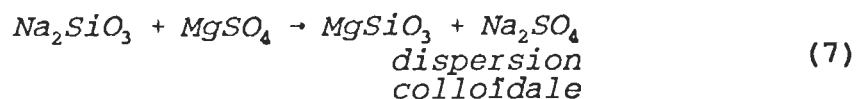
Tableau 4: Décomposition catalytique du peroxyde d'hydrogène



Finalement, le sulfite de sodium résiduel des procédés de mise en pâte chimicothermomécanique peut décomposer le peroxyde lors du blanchiment selon l'équation:



Sous les conditions de blanchiment, le sulfate de magnésium a un effet stabilisant sur la solution alcaline du peroxyde comme nous le montre la figure 13 (63). Il inhibe les effets catalytiques des métaux, particulièrement le fer, le cuivre et le manganèse, lesquels sont présents dans les pâtes de bois. Il forme avec le silicate de sodium un complexe. Le mécanisme de stabilisation s'effectue selon les équations suivantes (57):



Il en résulte un gain de blancheur supérieur lorsque le sel d'Epson est ajouté au silicate (64). Une partie du peroxyde se décompose malgré la présence de ce complexe puisque la chélation des métaux requiert un certain temps. Pour minimiser cette décomposition, la pâte est prétraitée avec un agent séquestrant tel le diéthylène triamine penta acétate de sodium (DTPA).

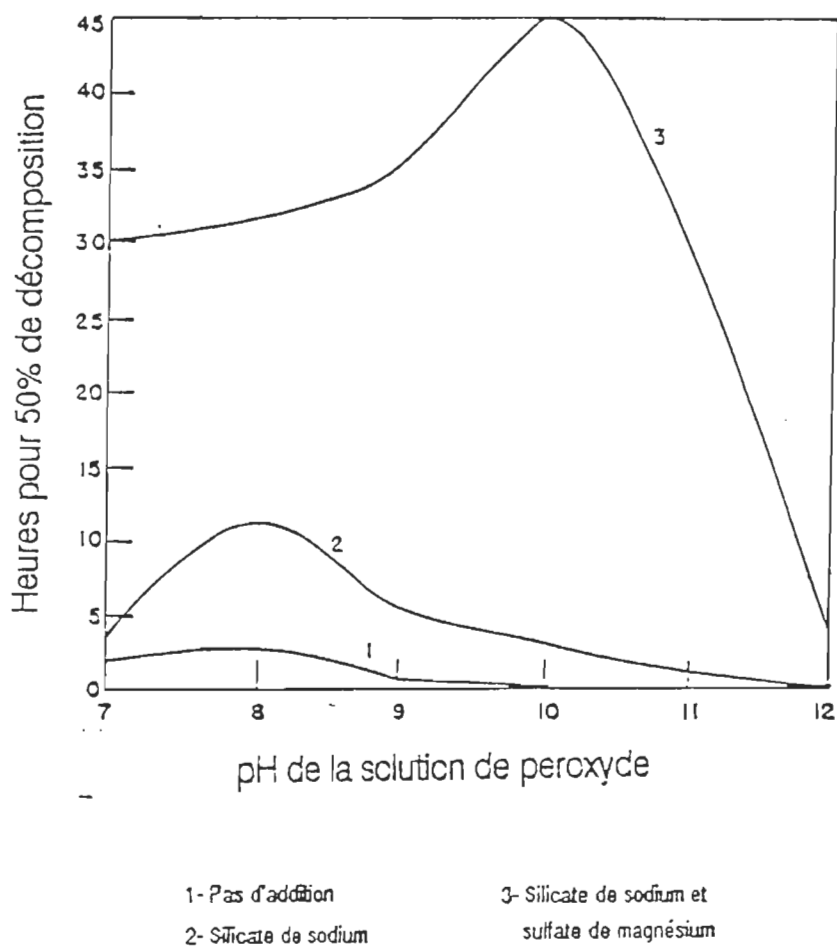


Figure 13: Effet stabilisant du sulfate de magnésium et du silicate de sodium sur le peroxyde d'hydrogène

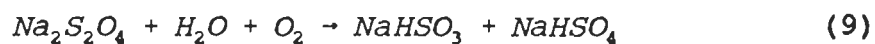
Lors du blanchiment avec le peroxyde, une partie de l'alcalinité est fournie par le silicate de sodium; le reste provient de l'addition d'hydroxyde de sodium. Il faut noter que le silicate de sodium et l'hydroxyde de sodium sont déjà utilisés dans la formulation chimique de désencrage. Ces produits représentent une source potentielle de diminution des coûts lorsque le blanchiment s'effectue au tritrateur.

2.4.4.2 Le blanchiment à l'hydrosulfite de sodium

L'hydrosulfite de sodium est un agent de blanchiment réducteur des chromophores de la lignine. La réaction de blanchiment de l'hydrosulfite réduit les quinones méthoxylées et les carbonyles en phénol et alcool correspondant. L'élimination de la couleur par réduction des chromophores de la lignine à l'aide de l'hydrosulfite est schématisée à la figure 14 (63). Les ions actifs de ce blanchiment sont le $S_2O_4^{2-}$ et le $HS_2O_4^-$.

Contrairement au blanchiment oxydant au peroxyde, lequel brise les liens entre les unités aromatiques (figure 15), le blanchiment réducteur à l'hydrosulfite ne réduit que les groupements chromophores (63,65).

En solution aqueuse, l'hydrosulfite de sodium est relativement instable. En présence d'oxygène, il se décompose rapidement en bisulfite de sodium et en bisulfate de sodium selon l'équation suivante:



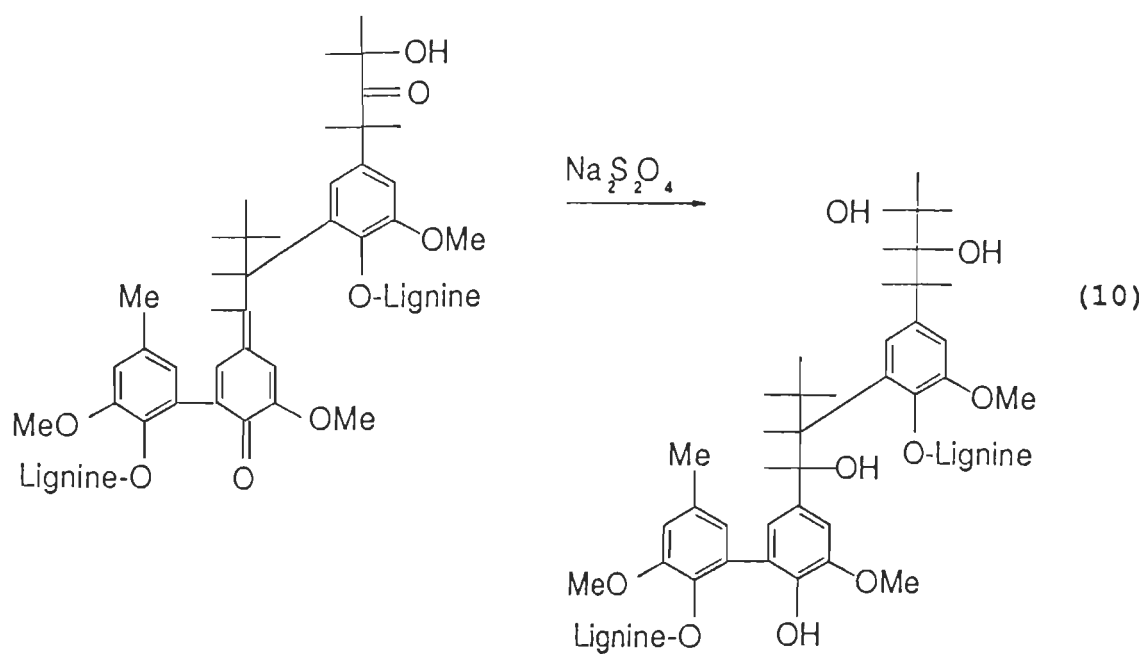


Figure 14: Elimination de la couleur par réduction des chromophores de la lignine
à l'aide de l'hydrosulfite de sodium

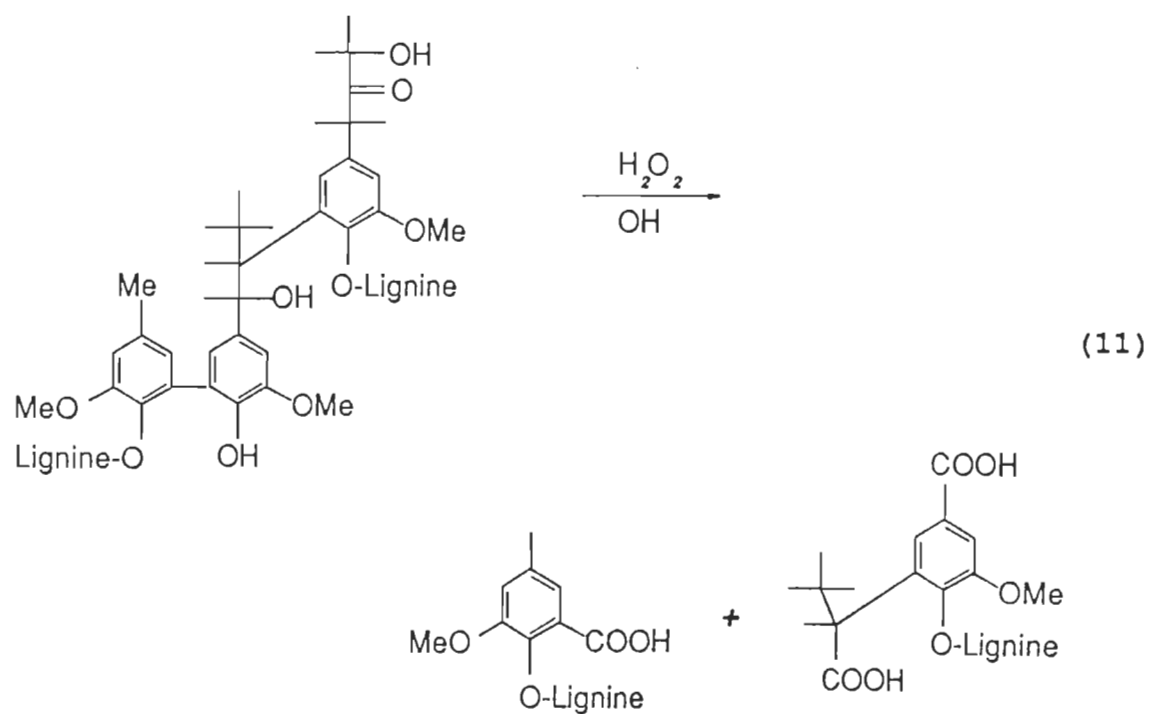
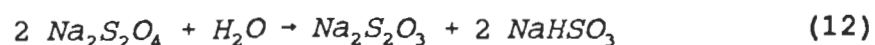


Figure 15: Elimination de la couleur par oxydation des chromophores de la lignine à l'aide du peroxyde d'hydrogène

En absence d'air, l'hydrosulfite de sodium se décompose en thiosulfate de sodium et en bisulfite de sodium d'après l'équation:



Pour l'ajustement du pH de la réaction, on utilise généralement l'acide sulfurique; idéalement un pH de 5.5 est employé pour le blanchiment à l'hydrosulfite.

2.4.5 Les conditions de blanchiment

Le tableau 5 montre les conditions théoriques que l'on retrouve régulièrement dans les travaux pour un blanchiment au peroxyde (32,50,54).

Tableau 5: Conditions théoriques du blanchiment au peroxyde d'hydrogène

Consistance (%)	12 et plus
Température (°C)	40 à 80
Temps (min.)	30 à 480
Na ₂ SiO ₃ (%)	3
NaOH (%)	1 à 3
H ₂ O ₂ (%)	1 à 5
pH	10 à 11

La quantité de soude caustique utilisée et le rapport soude/péroxyde ont une grande influence sur la blancheur finale de la pâte. Pour notre étude, on utilise l'alcali total pour le blanchiment externe au peroxyde d'hydrogène, il s'exprime de la façon suivante:

$$Alcali\ total = \% NaOH + 11.2\% Na_2SiO_3 \quad (13)$$

Un rapport entre l'alcali total et le peroxyde de 0.8 à 1.2% est régulièrement utilisé (66). Lors du blanchiment à l'hydrosulfite de sodium les conditions suivantes de réactions sont utilisées (17,26,52):

Tableau 6: Conditions théoriques du blanchiment à l'hydrosulfite de sodium

Consistance (%)	3 à 4
Température (°C)	60
Temps (min.)	60
N ₂ S ₂ O ₄ (%)	0.5 à 1.5
pH	entre 5 et 6

Bien que la consistance indiquée soit de 3 à 4% pour le blanchiment à l'hydrosulfite de sodium, de récents travaux montrent qu'il est possible de réaliser le blanchiment en utilisant une consistance de 10% et d'obtenir un gain de

blancheur équivalent. Cette consistance permet d'utiliser une tour de blanchiment plus petite, d'avoir un meilleur contrôle sur la blancheur et de diminuer le temps de rétention (67).

2.5 Les propriétés optiques et colorimétriques

Comme beaucoup de papiers sont vendus en fonction de leur apparence, les propriétés optiques et colorimétriques sont très importantes. Les principales propriétés sont la blancheur, l'opacité et la couleur.

2.5.1 Le degré de blancheur

La blancheur ISO est une mesure de l'intensité de la lumière réfléchie à une longueur d'onde de 457 nanomètres du spectre visible correspondant à la région du bleu. Elle ne tient compte que de la réflexion à une longueur d'onde. La blancheur ISO est un des standards acceptés dans le domaine des pâtes et papiers.

2.5.2 L'opacité

L'opacité est déterminée par la quantité de lumière qui est transmise. Lorsqu'aucune lumière n'est transmise, l'opacité est de 100% et elle est de zéro lorsque toute la lumière est transmise.

L'opacité d'impression s'exprime par le rapport entre l'intensité de lumière réfléchie d'une feuille sur fond noir (R_o) sur l'intensité de lumière réfléchie d'une pile de feuille de cette série (R_{∞}).

$$\text{Opacité d'impression} = R_o/R_{\infty} \quad (14)$$

2.5.3 La mesure de la couleur

Au cours de ces dernières années, le système CIE LAB s'est imposé de plus en plus pour les mesures de couleur et de blancheur. La mesure de couleur CIE s'effectue en utilisant trois filtres de lumière appropriés. Le filtre 9 est le filtre colorimétrique rouge dont la longueur d'onde est à 700 nm. Le filtre 10 est le filtre colorimétrique vert dont la longueur d'onde est à 500 nm. Le filtre 11 est le filtre colorimétrique bleu dont la longueur d'onde est à 450 nm.

Les calculs mathématiques sont effectués à partir des valeurs de réflectance des filtres 9, 10 et 11 pour obtenir dans un premier temps les stimuli X, Y et Z qui sont définis par les équations suivantes:

$$X = (0.782 R_{F9} + 0.198 R_{F11}) \quad (15)$$

$$Y = R_{F10} \quad (16)$$

$$Z = 1.181 R_{F11} \quad (17)$$

Après avoir calculé les stimuli X, Y et Z, il est possible d'évaluer les coordonnées de couleur L*, a* et b* du système standard CIE qui sont représentées par les équations suivantes:

$$\begin{aligned} &\text{Luminosité} \\ L^* &= [(116) (Y/100)^{\frac{1}{3}}] - 16 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} &\text{Teinte vert-rouge} \\ a^* &= 500 [(X/98.041)^{\frac{1}{3}} - (Y/100)^{\frac{1}{3}}] \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} &\text{Teinte bleu-jaune} \\ b^* &= 200 [(Y/100)^{\frac{1}{3}} - (Z/118.103)^{\frac{1}{3}}] \end{aligned} \quad (20)$$

Ces coordonnées de couleur permettent de quantifier les teintes du papier à partir du graphique CIE LAB (Figure 16). L'axe vertical L* représente la luminosité et

varie du noir au blanc (0 à 100). L'axe horizontal a^* représente le déplacement du vert au rouge (négatif à positif). L'axe horizontal b^* représente le déplacement du bleu au jaune (négatif à positif). Des coordonnées a^* et b^* près de zéro et la luminosité (L^*) la plus élevée possible sont recherchées pour le papier journal. Généralement, la coordonnée a^* se situe près de l'axe central pour le papier journal.

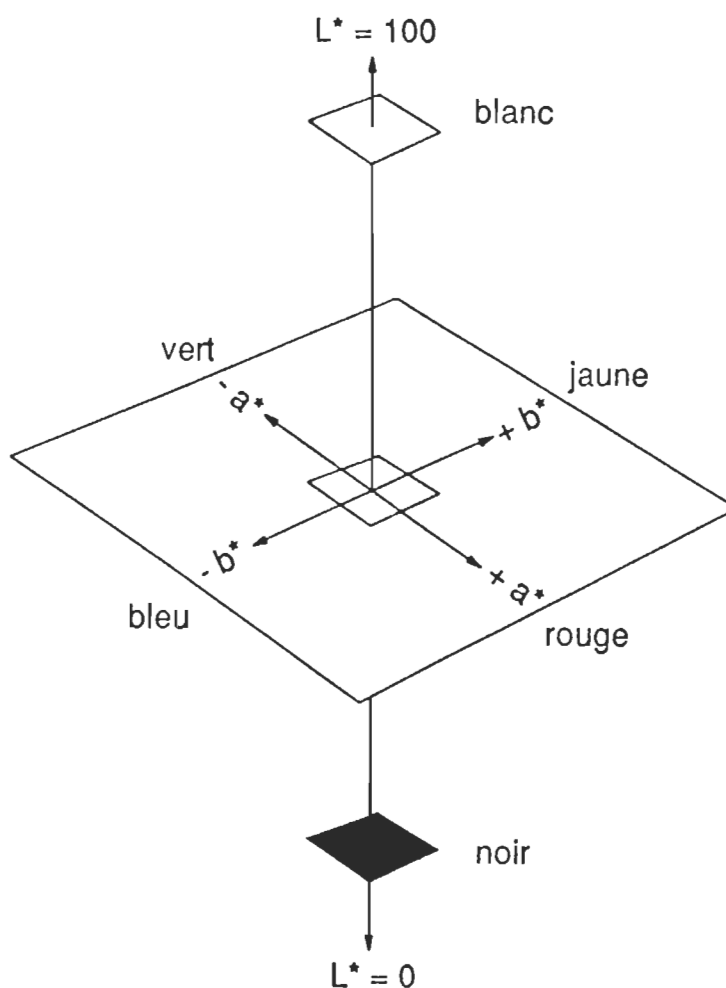


Figure 16: Coordonnées de couleur L^* , a^* , b^* (CIE Lab)

2.6 Caractérisation des vieux papiers

2.6.1 Le support

Le support utilisé dans notre étude est le papier journal. Le journal régional "Le Nouvelliste" fabriqué par la compagnie Stone-Consolidated de Shawinigan a servi pour tous les essais. La composition et les caractéristiques de ce journal sont présentées dans le tableau 7.

Tableau 7: Composition et caractéristiques du journal régional "Le Nouvelliste" de Trois-Rivières

Composition	16 à 18 % de pâte au sulfite 50 % de pâte thermomécanique 22 % de pâte mécanique de meule 10 à 15 % de cassé (papier recirculé)
Grammage	48 g/m ²
Humidité	6-7 %
Blancheur ISO	60-61 %

2.6.2 L'encre

Aujourd'hui, la presque totalité des journaux sont imprimés par le procédé lithographique offset. Ils utilisent de l'encre noire en grande majorité bien qu'on

retrouve aussi de faible quantité d'encre jaune, magenta et cyan. Le tableau 8 montre une formulation conventionnelle d'encre lithographique offset noire.

Tableau 8: Composition conventionnelle d'encre offset

composition	pourcentage
huile minérale	55-80
vernis	0-15
solvant	0-5
additifs	2-6
pigment	16-20

D'une édition à l'autre, la quantité d'encre utilisée est semblable pour un même nombre de pages. Le procédé d'impression offset est peu coûteux. Il est réalisé très rapidement et donne une bonne qualité d'impression. L'encre offset doit être visqueuse comparativement aux autres types d'encres puisque l'impression se fait sur surfaces planes. Le séchage de l'encre se fait par pénétration de l'huile minérale dans le papier et par oxydation.

2.7 Traitement statistique des résultats

La statistique est une partie de la science qui s'intéresse à généraliser à de grands ensembles (populations) les conclusions tirées des résultats obtenus avec des ensembles beaucoup plus restreints (échantillons). C'est ce qu'on appelle l'inférence statistique. Les statistiques sont utilisées pour analyser les résultats obtenus d'un plan expérimental qui réduit le nombre d'échantillons (68).

2.7.1 Le coefficient de corrélation

Un coefficient de corrélation tout comme une équation de régression est déterminé pour des résultats X et Y qui se présentent sous forme de paires. Le coefficient de corrélation r mesure la proximité de la linéarité d'une relation entre deux variables et de ce fait permet de déterminer si l'équation de régression peut être utilisée pour prédire des résultats. Ce coefficient de corrélation varie de +1 à -1 selon que la pente de la droite de régression est parfaitement positive à parfaitement négative respectivement. Il n'y a aucune corrélation entre les variables considérées si le coefficient a une valeur de zéro. Le coefficient obtenu est statistiquement significatif lorsque plus grand ou égal à une valeur dépendant du seuil de signification désirée, du nombre d'échantillons étudiés et du nombre de variables.

2.7.2 La régression

La courbe de régression est celle qui représente le mieux l'ensemble des points. L'équation de régression permet d'utiliser une variable X (variable indépendante) pour en prédire une autre Y (variable dépendante).

2.7.3 Le coefficient d'explication

Le coefficient d'explication est le rapport de la variation expliquée à la variation totale. Il nous donne le pourcentage de variation dans Y qui est expliqué par la droite de régression empirique.

3- PROCEDURE EXPERIMENTALE

3.1 Plan expérimental

L'objectif majeur de notre travail est d'étudier la possibilité de blanchir une pâte désencrée au tritrateur. Le plan expérimental que nous avons regardé se divise en trois volets:

- 1) Etude de l'influence de la consistance de la pâte et de la charge de peroxyde ajoutée au tritrateur sur le blanchiment.
- 2) Blanchiment conventionnel après désencrage.
- 3) Aspect économique de ces deux procédés.

3.1.1 Les abréviations utilisées

Pour chacune des expériences correspond une abréviation de la séquence. Le premier terme correspond à l'étape soit de la trituration (M), soit de la flottation (F) ou soit du blanchiment (P) ou (Y). La lettre P correspond au blanchiment avec le

peroxyde et Y au blanchiment avec l'hydrosulfite. Le second terme représente la consistance à laquelle la trituration ou le blanchiment fut réalisée. Le dernier terme après le tiret indique la charge de peroxyde ajouté au tritrateur lorsqu'il s'agit de l'étape de trituration ou de flottation et de la charge de peroxyde ou de l'hydrosulfite lorsqu'il s'agit de l'étape de blanchiment. En voici quelques exemples:

M10-1 : Résultat d'une trituration effectuée à 10% de consistance avec une charge en peroxyde de 1%.

F15-2 : Résultat d'une flottation dont la trituration fut réalisée à 15% de consistance avec une charge en peroxyde de 2%.

Y10-1 : Résultat d'un blanchiment réalisé à 10% de consistance avec une charge d'hydrosulfite de 1%.

3.2 La procédure de désencrage employée

La figure 17 représente la séquence expérimentale que nous avons utilisée.

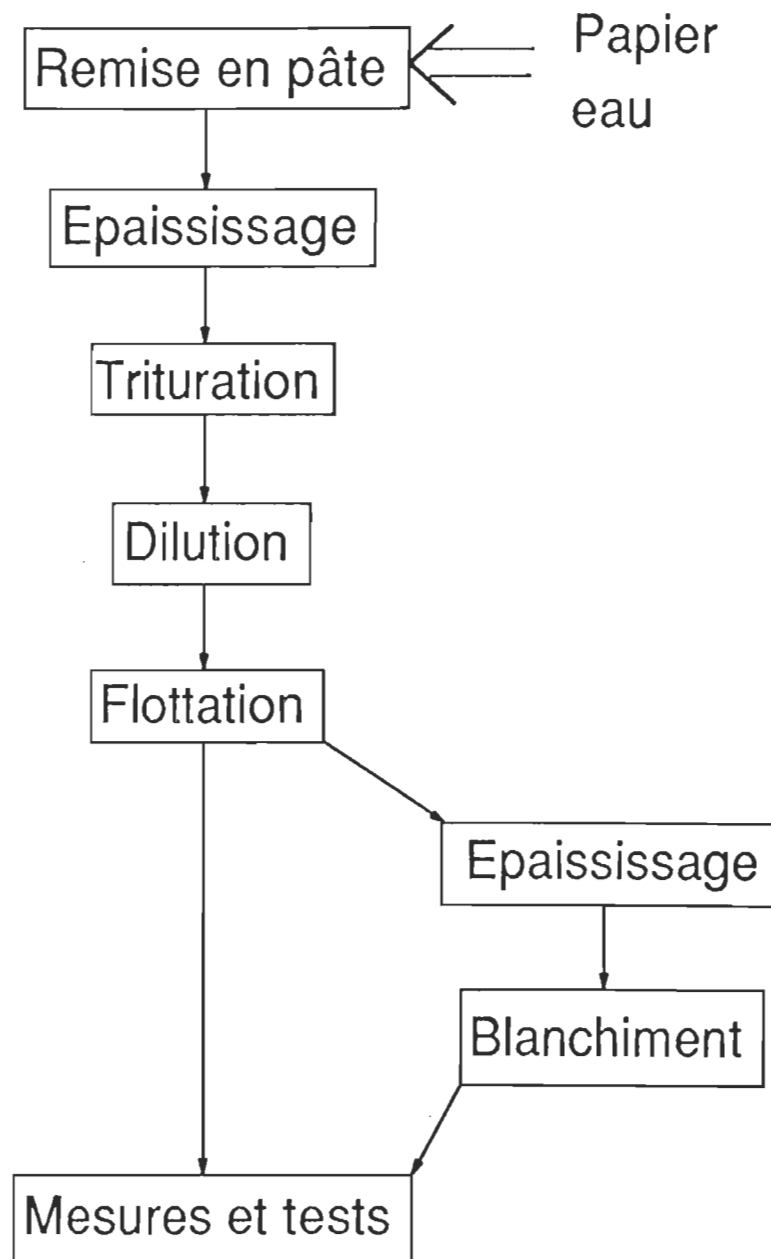


Figure 17: Séquence expérimentale

3.2.1 Le choix de la matière première à désencrer

La matière fibreuse secondaire utilisée était le papier journal "Le Nouvelliste" de Trois-Rivières dont l'impression ne dépassait pas six semaines. Ces journaux étaient conservés dans une chambre à humidité contrôlée pour fixer la siccité à 92% lors de l'utilisation. Chacune des expériences nécessite l'emploi de 110g anhydre de papier.

3.2.2 Le trempage du papier

Le papier était immergé dans l'eau pour une période de 12 heures de façon à faciliter sa désintégration lors de la trituration.

3.2.3 La remise en pâte

Le papier imbibé d'eau est pressé afin d'éliminer le surplus d'eau. Il est par la suite déchiré en morceaux grossiers et placé dans le tritrateur avec 11 litres d'eau chaude (40 à 45°C). Aucun produit chimique n'est ajouté. La figure 18 montre le tritrateur de laboratoire utilisé. La durée de la désintégration est de dix minutes.

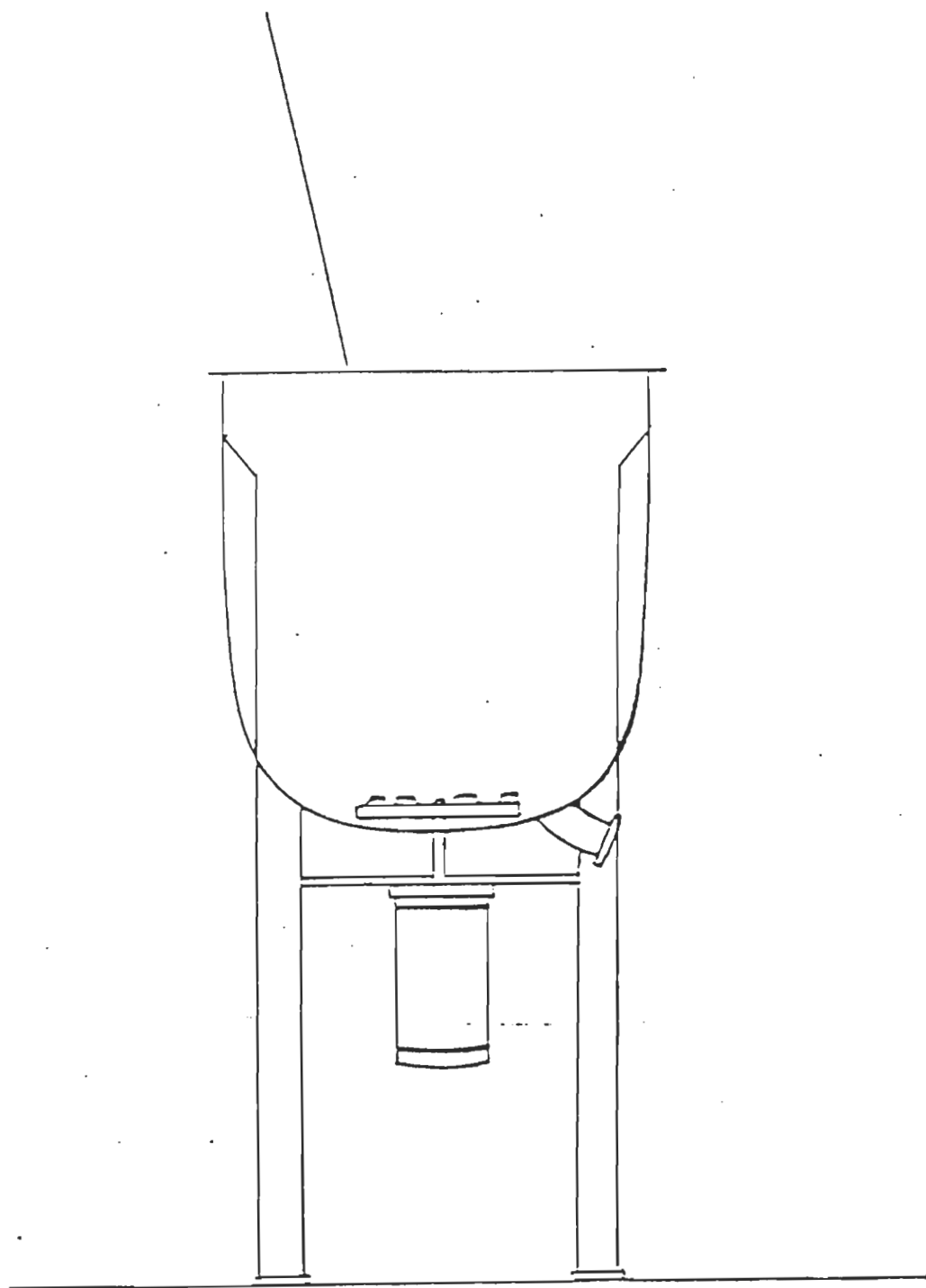


Figure 18: Schéma du tritrateur de laboratoire

3.2.4 L'essorage de la pâte

La pâte triturée est essorée mécaniquement et manuellement pour obtenir une consistance d'environ 27%. Un échantillon de 15g anhydre est retiré pour fabriquer nos feuilles de référence.

3.2.5 Le décrochage de l'encre et le blanchiment

La liqueur de décrochage est formée de 250 ml d'eau à 40°C, de DTPA (0.3%), de silicate de sodium (3%), d'acide oléique (2%) et de peroxyde d'hydrogène (0 à 2%). Le tableau 9 montre les conditions d'opération et les charges des produits ajoutés au tritrateur et à la flottation. Par la suite, la liqueur est ajoutée à la pâte ainsi que l'eau pour atteindre la consistance voulue. La figure 19 présente le type de mélangeur utilisé.

Avant d'opérer le mélangeur, la pâte et la liqueur sont homogénéisées manuellement pendant environ deux minutes, le pH et la température sont notées. Le mélange s'effectue pendant 20 minutes. A la fin de cette expérience, la température et le pH sont notés et le peroxyde résiduel est dosé. Par la suite, il est neutralisé à l'aide du métabisulfite de sodium. Un échantillon de 15g anhydre de pâte est prélevé pour la fabrication des feuilles de référence.

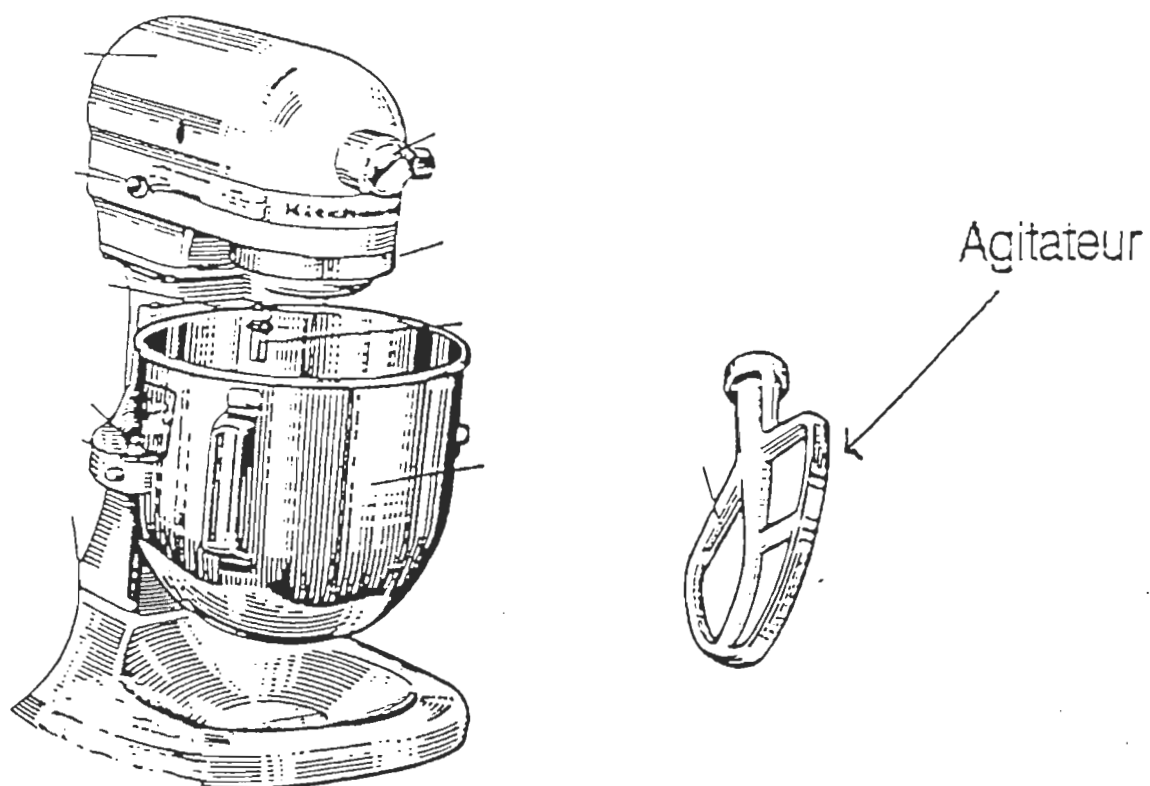


Figure 19: Schéma du mélangeur utilisé pour le décrochage de l'encre et le blanchiment

3.2.6 La flottation

La figure 20 montre la cellule de flottation Voith de laboratoire utilisée. Cette cellule circule constamment la pâte acceptée contrairement à un système industriel où celle-ci est dirigée vers une autre cellule.

Les conditions d'opération de la flottation sont présentées à l'intérieur du tableau 9 cité précédemment. Avant le démarrage de la cellule, il est important de fixer le pH, la température et la dureté de l'eau. La durée de la flottation est d'une période de 10 minutes. La flottation terminée, la mousse (rejets) est éliminée à l'aide d'une spatule avant que la pâte soit récupérée. L'accepté servira à fabriquer les feuilles de référence et au dosage iodométrique du peroxyde résiduel.

3.2.7 Le blanchiment

Dans la seconde partie de notre expérimentation, la pâte subit les mêmes traitements que précédemment, cependant, le peroxyde d'hydrogène n'est pas ajouté à la liqueur lors de l'étape de décrochage. En fait, il s'agit d'un cycle de désencrage standard sans agent de blanchiment.

Tableau 9: Conditions opérationnelles et charges des produits utilisés lors du désencrage

	Trituration	Flottation
Consistance (%)	2-20	0.4
Na_2SiO_3 (%)	3.0	-
pH (NaOH)	10.5	9.0
H_2O_2 (%)	0-2	-
DTPA (%)	0.3	-
Température (°C)	25	40
Temps (min.)	20	10
Oléate de sodium (%)	2	-
CaCl_2 (ppm)	-	180

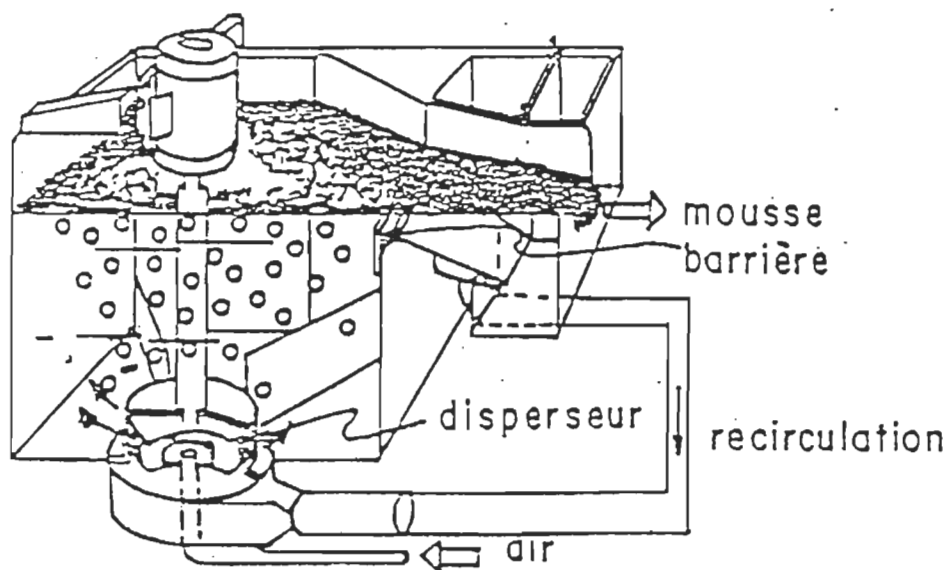


Figure 20: Schéma de la cellule de flottation de laboratoire (Voith)

Un échantillon de 20g anhydre est prélevé de l'accepté de la flottation et servira pour la fabrication des feuilles de référence. La pâte restante est épaissie approximativement à 35%. Cette pâte est utilisée pour les blanchiments externes au peroxyde d'hydrogène et à l'hydrosulfite de sodium.

3.2.7.1 Le blanchiment au peroxyde d'hydrogène

Le tableau 10 donne la composition de la liqueur de blanchiment et les conditions utilisées pour ce type de blanchiment.

La liqueur de blanchiment est mélangée à un échantillon de 20g anhydre de pâte désencrée dans un sac de polyéthylène transparent. La pâte est triturée pour obtenir un mélange homogène dont le pH est déterminé. Par la suite, l'air est éliminé du sac avant d'être scellé et immergé dans un bain thermostaté.

A la fin du traitement, deux échantillons de 40 ml chacun de liqueur sont prélevés pour déterminer le peroxyde résiduel et le pH final.

La pâte blanchie est diluée à une consistance de 1% et est neutralisée à un pH de 5.5 avec le métabisulfite de sodium. Un temps de contact minimum de 5 minutes est requis pour la décomposition du peroxyde résiduel et la stabilisation

de la blancheur. Par la suite, la pâte est filtrée et utilisée pour la formation des feuilles. La solution de peroxyde d'hydrogène et le peroxyde résiduel sont dosés par iodométrie.

3.2.7.2 Le blanchiment à l'hydrosulfite de sodium

Comme le blanchiment au peroxyde, le blanchiment à l'hydrosulfite s'effectue dans un sac de polyéthylène. Les conditions expérimentales sont présentées dans le tableau 11. Le pH de la pâte est ajusté à 5.5 avec l'acide sulfurique.

L'oxygène est évacué du sac par l'introduction d'azote pendant 2 à 3 minutes, la solution d'hydrosulfite de sodium est par la suite mélangée à la pâte. Le sac est scellé et immergé dans un bain thermostaté. Après ces réactions, le pH final du mélange est déterminé. La pâte est lavée afin de servir à la fabrication des feuilles standards.

Dans l'annexe B, on retrouve toutes les expériences effectuées ainsi que les valeurs expérimentales.

Tableau 10: Conditions expérimentales et charges des produits utilisés pour le blanchiment au peroxyde d'hydrogène

Consistance (%)	12	12	12	25	25	25
température (°C)	70	70	70	70	70	70
Temps (min.)	90	90	90	90	90	90
pH initial	10.4	10.6	10.8	10.2	10.4	10.7
pH final	9.1	8.9	9.0	9.1	9.4	8.9
Na ₂ SiO ₃ (%)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
MgSO ₄ (%)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
NaOH (%)	0.768	0.864	2.064	0.768	0.864	2.064
DTPA (%)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
H ₂ O ₂ (%)	0.36	1.00	2.00	0.10	1.00	2.00

Tableau 11: Conditions expérimentales et charges des produits utilisés pour le blanchiment à l'hydrosulfite de sodium

Consistance (%)	10
Température (°C)	60
Temps (min.)	60
DTPA (%)	0.4
pH	5.5
Na ₂ S ₂ O ₄ (%)	0.3, 0.5, 1.0

3.3 Méthodes d'analyse des résultats

3.3.1 Les propriétés papetières

Les propriétés optiques et mécaniques du papier ont été évaluées en conformité avec les normes standards de l'Association canadienne des pâtes et papiers (CPPA).

3.3.2 L'analyse du peroxyde résiduel

Le peroxyde résiduel est mesuré par titrage iodométrique selon la norme standard CPPA (J.16P.).

3.3.3 L'analyse statistique

Comme outil d'interprétation de nos résultats, nous utilisons un programme d'analyse statistique. Ce programme nous permet de trouver les associations entre les variables dépendantes et indépendantes.

Par exemple, l'influence de la consistance de trituration sur la blancheur de nos feuilles. Ce programme utilise le modèle de régression multiple suivant:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_k X_{ik} + \epsilon_i \quad (21)$$

La variable dépendante ou expliquée est représentée par Y_i . Les coefficients du modèle sont estimés à l'aide des données et sont représentés par $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$. La méthode des moindres carrés est utilisée comme méthode d'estimation de ces paramètres. Les termes $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ik}$ sont les valeurs explicatives du modèle. Ces termes peuvent être des termes linéaires, quadratiques ou leurs interactions. Ces variables sont fixées expérimentalement à des niveaux arbitraires. Finalement, le dernier terme de l'équation (ϵ_i) représente l'erreur aléatoire. Cette composante du modèle correspond à la fluctuation non expliquée des Y_i par les variables $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ik}$. Les autres variables explicatives qui auraient été omises dans le modèle se retrouvent alors dans ϵ_i .

Cette équation tient compte des variables indépendantes X_k individuellement significatives déterminées soit par l'analyse de corrélation (test d'hypothèse sur les coefficients de corrélation) et/ou par l'analyse de régression (test du Fisher). Des informations supplémentaires sont présentées à l'annexe A.

La planification expérimentale ne repose pas sur un plan expérimental préétabli comme le Placket-Burman ou les plans de réponse de surface. L'utilisation des précédents modèles n'est pas possible car ils doivent contenir que des variables quantitatives. Le modèle étudié inclut des variables qualitatives (stage de désencrage, stage de blanchiment à différentes consistances) que l'on traite avec des variables auxiliaires qui prennent la valeur de 0 ou 1. Le choix des variables à étudier est basé sur la littérature. Les variables dépendantes "Y" sont mesurées pour des valeurs choisies de "X".

L'étude a trois parties, seulement les deux premières ont fait l'objet d'analyses statistiques. Dans la première partie, le blanchiment est réalisé au tritrateur à différentes consistances. Dans la seconde partie, la pâte désencrée est blanchie dans une tour externe. Finalement, pour la troisième partie, le blanchiment est réalisé au tritrateur avec 1 ou 2% de peroxyde d'hydrogène à la consistance de 10% (consistance sélectionnée de la première partie).

Première partie

La consistance est examinée de plus près afin de vérifier:

- 1) si son influence sur le peroxyde est aussi importante que dans un blanchiment conventionnel.

- 2) s'il est possible d'éliminer le stage de blanchiment en ajoutant le peroxyde au tritrateur et en augmentant la consistance de trituration.

Les charges en peroxyde sont fixées à des valeurs fréquemment utilisées dans le domaine c'est-à-dire 1 et 2%. Des charges supérieures sont inacceptables compte tenu des conditions qui prévalent au tritrateur. Le modèle postulé avait la possibilité d'inclure une combinaison de vingt-trois (23) variables indépendantes parce que les variables X_1 et X_3 ont deux (2) niveaux et la variables X_2 a six (6) niveaux. Les 23 variables sont les termes linéaires de X_1 , X_2 et X_3 , les termes de l'ordre 2 à l'orde 5 (6 niveaux) de la variable X_2 et les termes des interactions résultantes. Le modèle étudié contient 10 variables indépendantes mentionnées dans le tableau 12. L'influence linéaire (X_1 , X_2 et X_3), quadratique (X_2) et les interactions d'ordre 3 et moins sont évaluées.

Seconde partie

Dans un second volet, nous avons réalisé des blanchiments conventionnels en trois points sur la pâte désencrée. Notre objectif n'est pas d'optimiser les blanchiments conventionnels mais de les utiliser pour fin de comparaison avec le blanchiment au tritrateur.

Le modèle avait la possibilité d'inclure une combinaison de huit (8) variables indépendantes puisque les variables X_5 et X_6 ont deux (2) niveaux et la variable X_4 a six (6) niveaux. Les 8 variables sont les termes linéaires de X_4 , X_5 et X_6 , le terme quadratique (trois niveaux) de la variable X_4 et les termes des interactions résultantes. Le modèle étudié contient les 8 variables indépendantes mentionnées dans le tableau 13.

L'analyse de ces résultats permet de prédire la charge à appliquer pour obtenir des résultats similaires à ceux du blanchiment au tritrateur.

Tableau 12: Fishers partiels et coefficients de détermination multiple de chacun des termes des équations de prédictions des figures 21 à 24

figures		X_1	X_2	X_3	$(X_2)^2$	$X_1 \cdot X_2$	$X_1 \cdot (X_2)^2$	$X_1 \cdot X_3$	$X_2 \cdot X_3$	$(X_2)^2 \cdot X_3$	$X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$
21	Fisher P. R ² (%)	14.2 79.7	36.3 74.5			14.1 84.8			128.6 46.6	40.8 61.4	
22	Fisher P. R ² (%)		163.0 50.1	5.0 86.8	62.8 69.5			51.3 85.2			
23	Fisher P. R ² (%)		9.7 62.9			71.4 65.9		3.9 55.3			
24	Fisher P. R ² (%)			644.8 68.1				31.3 94.7	220.9 91.4		7.1 95.5

Tableau 13: Fishers partiels et coefficients de détermination multiple de chacun des termes des équations de prédictions des figures 25 à 31

Figures		X_4	X_5	X_6	$(X_4)^2$	$X_4 \cdot X_5$	$X_4 \cdot X_6$	$X_5 \cdot (X_4)^2$	$X_6 \cdot (X_4)^2$
25	Fisher P. R ² (%)	1734.8 87.0			122.9 93.2				95.5 98.0
26	Fisher P. R ² (%)	748.8 80.9			54.8 86.9				101.5 97.8
27	Fisher P. R ² (%)		8.0 87.6	97.8 80.9					
28	Fisher P. R ² (%)	676.1 86.4			20.2 97.5		66.6 94.9		
29	Fisher P. R ² (%)	26.8 62.5							
31	Fisher P. R ² (%)	47.3 54.9		21.1 79.4					3.7 83.8

Le traitement statistique des résultats de ces deux parties donne des équations qui sont utilisées pour tracer les courbes des figures numéro 21 à 31 inclusivement. Elles indiquent les paramètres déterminants (variables indépendantes) de chacune des propriétés étudiées (variables dépendantes). Il est à noter que les graphiques contiennent les points expérimentaux ainsi que les courbes calculées. Le tableau 14 présente les équations de prédiction, les coefficients de détermination multiple (R^2) et l'erreur expérimentale de chacune des variables dépendantes présentées dans les figures 21 à 31.

Tableau 14: Equations de prédiction, coefficients de détermination multiple et erreur expérimentale des figures 21 à 31

Figures	R ² (%)	Err. (%)	Equations de prédiction
21	84.8	7.0	$Y = 54.27 + 2.42*X_1 + 0.33*X_2 - 0.15*X_1*X_2 + 0.39*X_2*X_3 - 0.02*(X_2)^2*X_3$
22	86.8	5.5	$Y = 80.73 + 0.63*X_2 + 0.39*X_3 - 0.02*(X_2)^2 + 0.65*X_1*X_3$
23	65.9	11.5	$Y = 5.64 + 0.07*X_2 + 0.05*X_1*X_2 + 0.32*X_1*X_3$
24	95.5	1.6	$Y = X_3 - Y_{rés.} = 0.03 + 1.07*X_3 - 0.19*X_1*X_3 - 0.03*X_2*X_3 + 0.01*X_1*X_2*X_3$
25	99.1	0.3	$Y = 56.8 + 14.55*X_4 - 4.04*(X_4)^2 - 9.63*X_6*(X_4)^2$
26	97.8	0.8	$Y = 82.80 + 10.38*X_4 - 3.17*(X_4)^2 - 4.26*X_6*(X_4)^2$
27	87.6	2.0	$Y = 7.84 - 0.87*X_5 - 3.08*X_6$
28	97.5	2.4	$Y = 98.72 - 5.81*X_4 + 1.17*(X_4)^2 + 3.38*X_4*X_6$
29	62.6	20.0	$Y = 2.89 + 0.70*X_4$
30	0		$Y = 7.266$
31	83.8	14.0	$Y = 1.75 + 0.24*X_4 + 0.26*X_6 - 0.15*(X_4)^2*X_6$

Où: X_1 = Le stage de trituration (0) et de flottation (1)

X_2 = La consistance de trituration qui varie de 2 à 20%

X_3 = La charge de peroxyde qui prend la valeur de 1 et 2%

X_4 = Le pourcentage de peroxyde (0 à 2%) ou d'hydrosulfite (0 à 1%)

X_5 et X_6 = variables auxiliaires:

	X_5	X_6
H ₂ O ₂ à 12% consistance	0	0
H ₂ O ₂ à 25% consistance	1	0
Na ₂ S ₂ O ₄ à 10% consistance	0	1

Voici, un exemple de l'équation de la figure 21 pour faciliter la compréhension. Si nous sommes au stage de trituration à une consistance de 10%, avec une charge en peroxyde de 1%, l'équation de prédiction pour la blancheur donne:

$$Y (\text{blancheur}) = 54.27 + 2.42 * (\text{stage}) + 0.33 * (\text{consistance}) - 0.15 * (\text{stage}) * (\text{consistance}) + 0.39 * (\text{consistance}) * (\text{charge}) - 0.02 * (\text{consistance})^2 * (\text{charge})$$

$$Y (\text{blancheur}) = 54.27 + 2.42 * (0) + 0.33 * (10) - 0.15 * (0) * (10) + 0.39 * (10) * (1) - 0.02 * (10)^2 * (1)$$

$$Y (\text{blancheur}) = 59.5\%$$

Les tableaux 12 et 13 mentionnés précédemment, présentent les Fishers partiels et les coefficients de détermination mutiple de chacun des termes utilisés pour construire les équations de prédiction des figures 21 à 31. Ces données indiquent la contribution et l'importance de chacun des termes. Par exemple, l'addition du

terme X_1 (le stage) dans l'équation de la figure 21 contribue à expliquer 5.2% (79.7-74.5) de la variation totale.

Utilisons la table de variance de l'équation de la figure 21 pour exprimer la manière dont procède le programme.

Table de variance de l'équation de la figure 21:

Source de variation	Somme des carrés	degrés de liberté	Carré moyen	Fisher calculé
variation totale	197.97	47		
variation due à la régression	167.84	5	33.568	46.789
variation résiduelle	30.132	42	0.71742	

L'équation de prédiction est:

$$Y = 54.27 + 2.42 \cdot X_1 + 0.33 \cdot X_2 - 0.15 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0.39 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.02 \cdot (X_2)^2 \cdot X_3$$

Eprouvons l'hypothèse que la régression n'est pas significative, c'est-à-dire

$$H_0 : \beta_1 = 0$$

$F_{\text{calculé}}$ est $F = \text{CMR}/\text{CM}_{\text{rés}} = 33.568/0.71742 = 46.789$ avec 5 et 42 degrés de liberté.

Avec un risque d'erreur $\alpha=0.05$, le $F_{\text{théorique}}$ (dû au hasard) est $F_{.05,5,42} \approx 2.45$.

Puisque $46.789 > 2.45$, nous ne pouvons accepter l'hypothèse nulle; il semble avoir évidence statistique que la régression est significative au niveau $\alpha=0.05$. Le coefficient de détermination est $R^2 = \text{SCT}/\text{SCR} = 167.84/197.97 = 84.8\%$.

Ainsi, 85% de la variation totale est expliquée par l'équation de prédiction. De la même façon, chacun des termes de l'équation de prédiction est vérifié avant d'être accepté comme ayant une contribution significative. Cette équation permet de prédire la blancheur qui peut être obtenue si la pâte désencrée de papier journal est blanchie au tritrateur à l'aide du peroxyde en fonction de la consistance, du stage et de la charge.

4- RESULTATS ET DISCUSSION

Dans ce chapitre, nous discutons des résultats obtenus au cours de notre expérimentation. La première section porte sur le blanchiment au tritrateur et sur l'effet de la neutralisation du peroxyde. La section suivante présente le comportement des blanchiments conventionnels appliqués à la pâte désencrée. La troisième section compare le blanchiment au peroxyde réalisé au tritrateur à celui réalisé à la tour externe. La dernière section traite de l'aspect économique de ces différents blanchiments.

4.1 Influence de la consistance de trituration et de la charge de peroxyde d'hydrogène ajouté sur les propriétés optiques et physiques du papier Journal recyclé

4.1.1 Le blanchiment au tritrateur

La figure 21 illustre l'effet de la consistance à la trituration (2% à 20%) sur la blancheur de la pâte désencrée. L'addition de peroxyde s'effectue à l'étape de trituration et les charges de peroxyde utilisées sont 1% et 2%. Le peroxyde

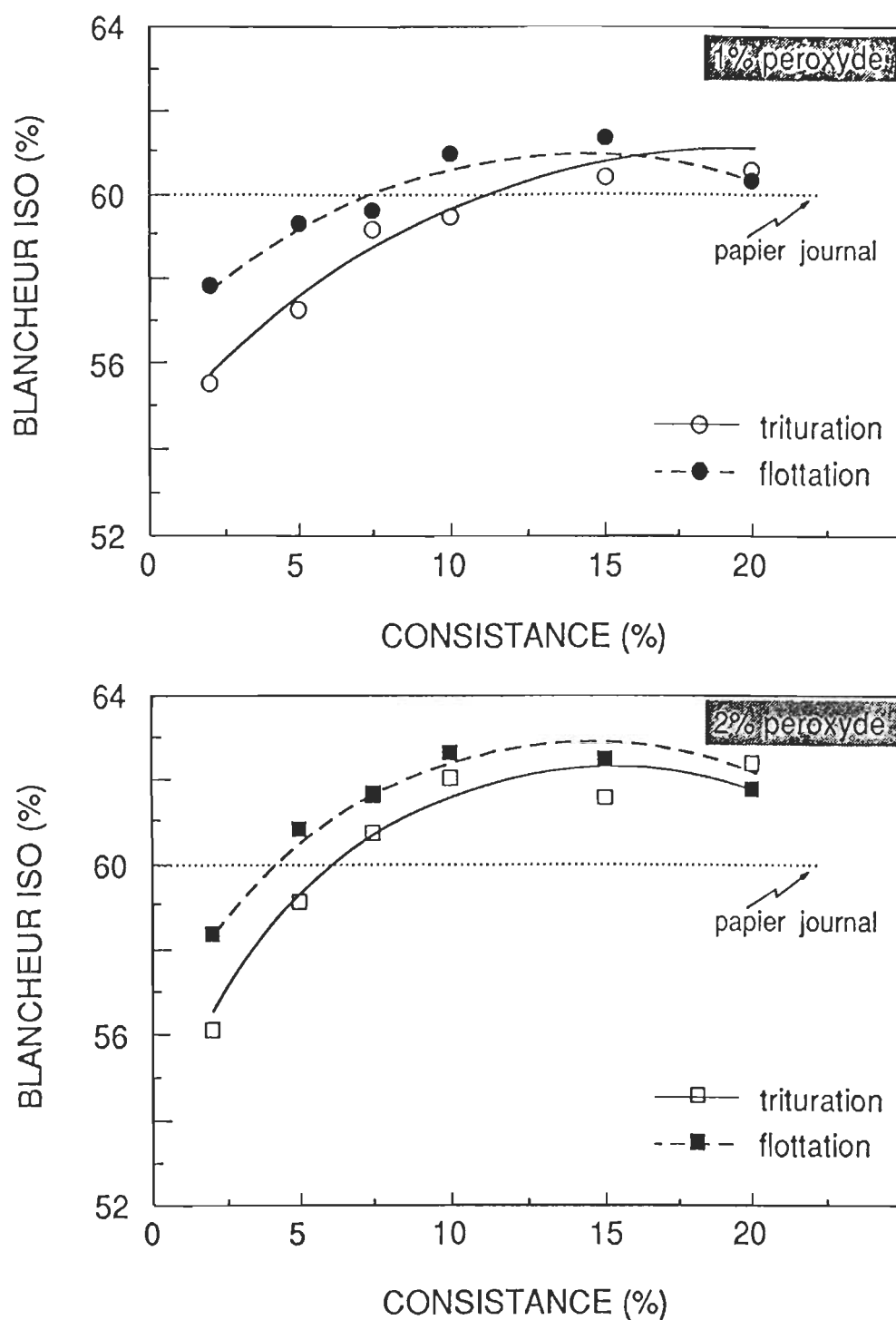


Figure 21: Blancheur du papier en relation avec la consistance de trituration pour différentes charges de peroxyde d'hydrogène

résiduel n'est pas neutralisé après l'étape de trituration. La blancheur de référence que nous utilisons pour notre travail est celle du journal Le Nouvelliste; représentée par la ligne pointillée sur le graphique. L'objectif primordial est d'atteindre les propriétés papetières de ce journal.

On observe que l'augmentation de la consistance et de la charge de peroxyde à la trituration améliore la blancheur. La plus grande efficacité du peroxyde à haute consistance provient d'un meilleur contact entre la fibre et l'ion perhydroxyle. L'encre étant éliminée de la suspension, le niveau de blancheur après l'étape de flottation est supérieur à celui obtenu après l'étape de trituration. Une consistance de trituration de 7.5% avec une charge de 1% en peroxyde est nécessaire pour atteindre la blancheur désirée (60% ISO). Ces résultats sont en accord avec les études de Carmichael (7), et de Putz et Götsching (17).

A la figure 22, on constate que la luminosité présente le même comportement que la blancheur. La blancheur et la luminosité sont des mesures d'intensité de lumière réfléchie à des longueurs d'onde de 457 nm et de 500 nm respectivement ce qui explique la similitude des comportements.

La figure 23 montre l'influence de la consistance sur la coordonnée de couleur b^* . Une valeur positive de b^* élevée représente une teinte jaune prononcée.

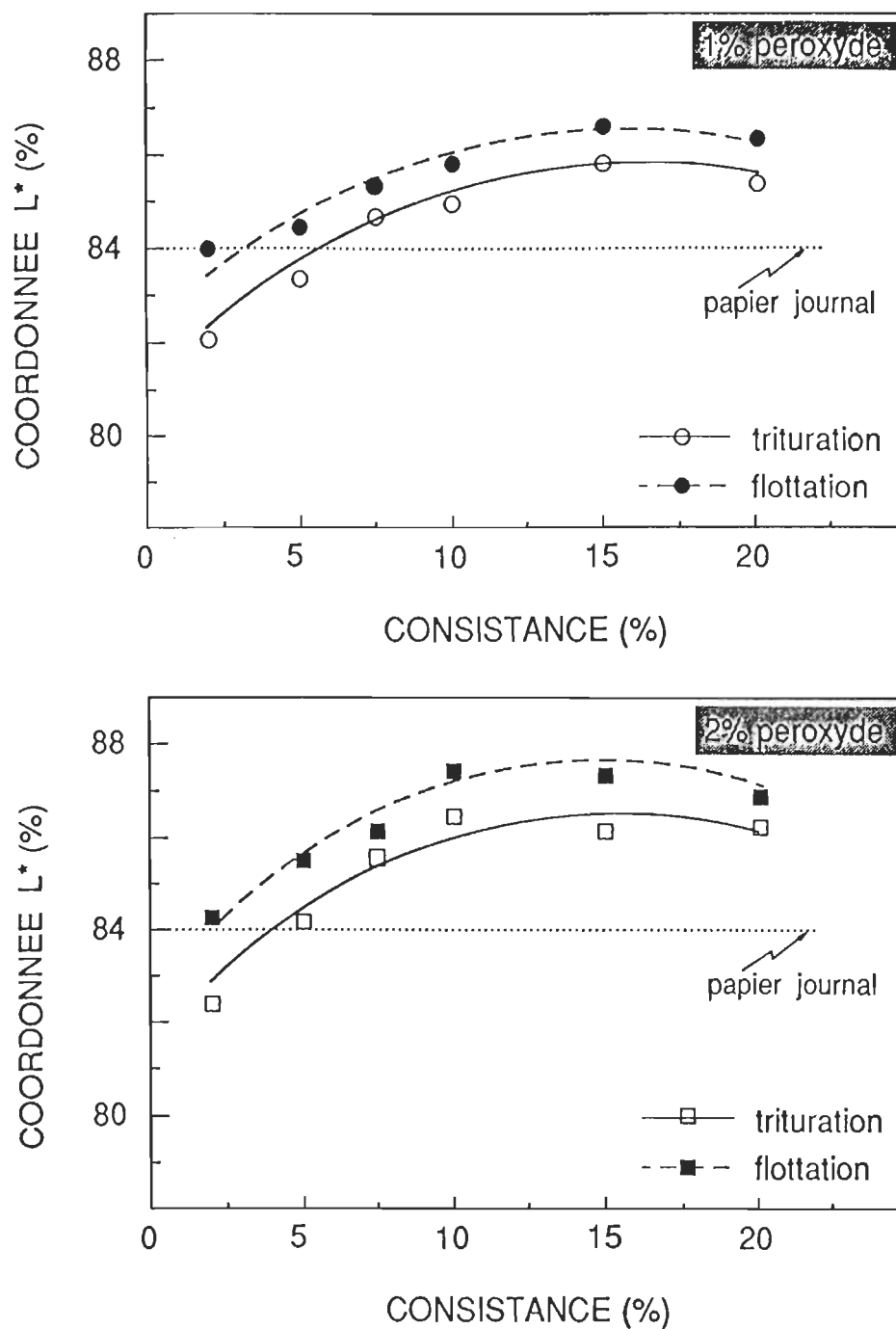


Figure 22: Luminosité (L^*) du papier en relation avec la consistance de trituration pour différentes charges de peroxyde d'hydrogène

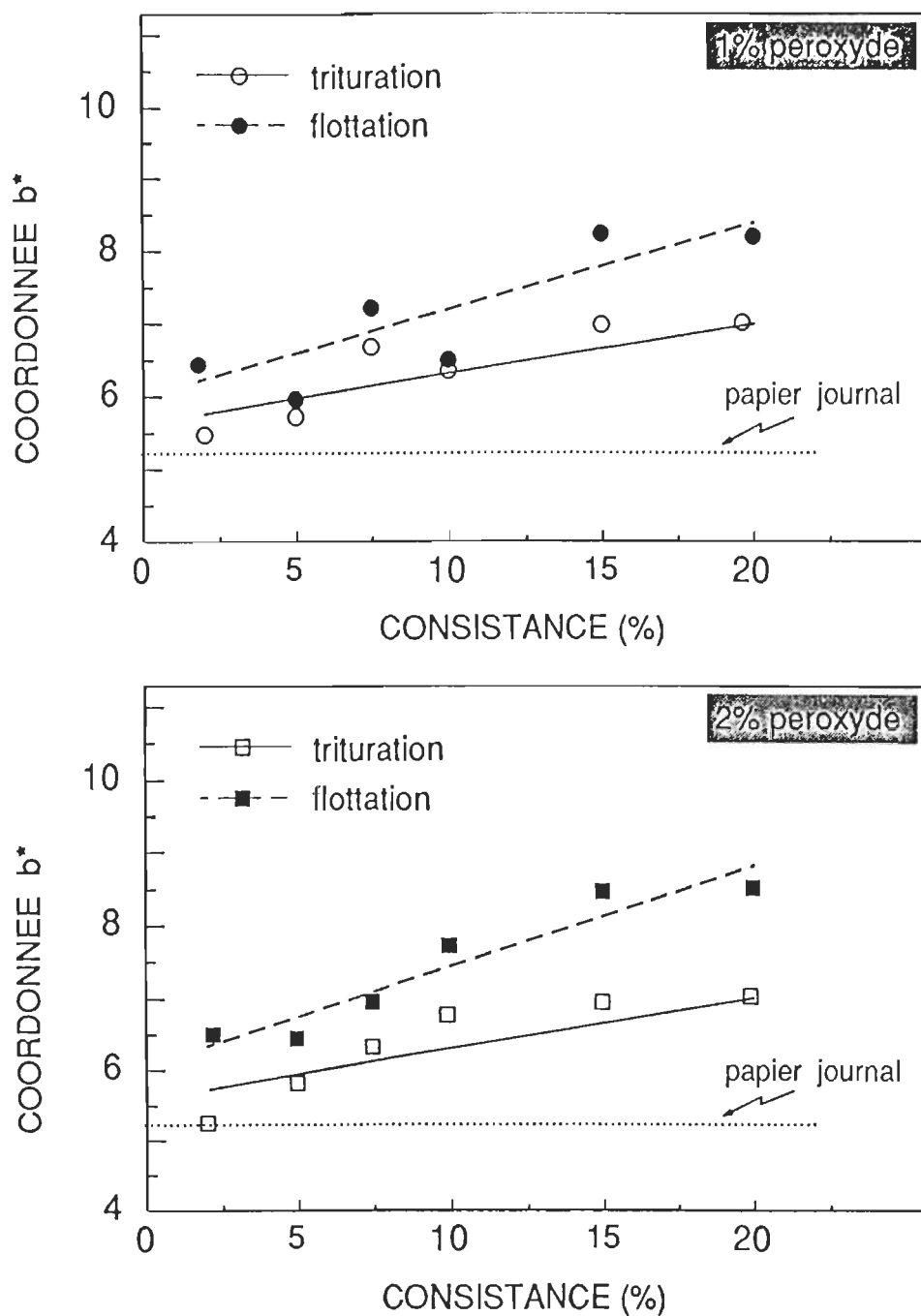
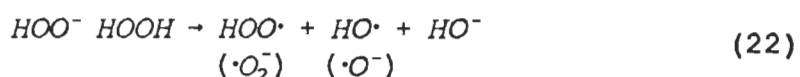


Figure 23: Teinte jaune (coordonnée b^*) du papier en relation avec la consistance de trituration pour différentes charges de peroxyde d'hydrogène

La valeur idéale se situe à zéro, cependant une valeur inférieure à 5.24 rencontre l'objectif de notre étude. La teinte jaune du papier augmente proportionnellement avec la consistance puisque l'alcali est de plus en plus élevé. Le peroxyde ne permet pas de maintenir la teinte jaune à son niveau le plus bas. De plus, le peroxyde contribue possiblement, en se décomposant, à l'augmentation de la teinte jaune à de hautes consistances. Après l'étape de flottation, les valeurs de b^* sont plus élevées qu'après l'étape de trituration puisque la pâte demeure plus longtemps en milieu alcalin et qu'il y a décomposition du peroxyde. La neutralisation du peroxyde après l'étape de trituration devrait éviter une augmentation supplémentaire de la teinte jaune.

Plusieurs responsables des procédés de désencrage ajoutent du peroxyde au tritrateur pour protéger la pâte contre le jaunissement excessif en milieu alcalin. Cette addition est habituellement inférieure à la valeur de 1% (4,28,34).

Une charge en peroxyde supérieure (exemple 2%) est nuisible puisque l'excédent de peroxyde se décompose selon l'équation 22 et augmente la teinte jaune du papier. L'ajout de peroxyde au tritrateur est insuffisant pour réduire la teinte jaune sous notre référence c'est-à-dire 5.24.



La figure 24 présente la consommation du peroxyde en relation avec la consistance de trituration. Sur celle-ci, nous avons représenté la consommation du peroxyde après la trituration et après le cycle de désencrage complet (total) c'est-à-dire après les étapes de trituration et de flottation. Nous constatons que l'augmentation de la consistance à la trituration favorise une plus grande consommation du peroxyde. Conséquemment, la quantité de peroxyde disponible à la flottation diminue. Ainsi, l'écart entre la consommation totale et la trituration diminue avec l'augmentation de la consistance de trituration.

Cependant, une plus grande consommation du peroxyde ne signifie pas automatiquement une meilleure réponse au blanchiment puisque le peroxyde consommé englobe la partie active et la partie décomposée qui n'est pas efficace. Les résultats exprimés sur ce graphique avec ceux de la blancheur (figure 21), permettent d'affirmer que le peroxyde est plus efficace à haute consistance.

4.1.2 La neutralisation du peroxyde

Le tableau 15 présente l'influence de la neutralisation du peroxyde sur les propriétés de la pâte désencrée et blanchie au triturateur à une consistance de 10%. Les résultats indiquent que la neutralisation du peroxyde après l'étape de trituration n'abaisse que très légèrement la teinte jaune de la pâte produite.

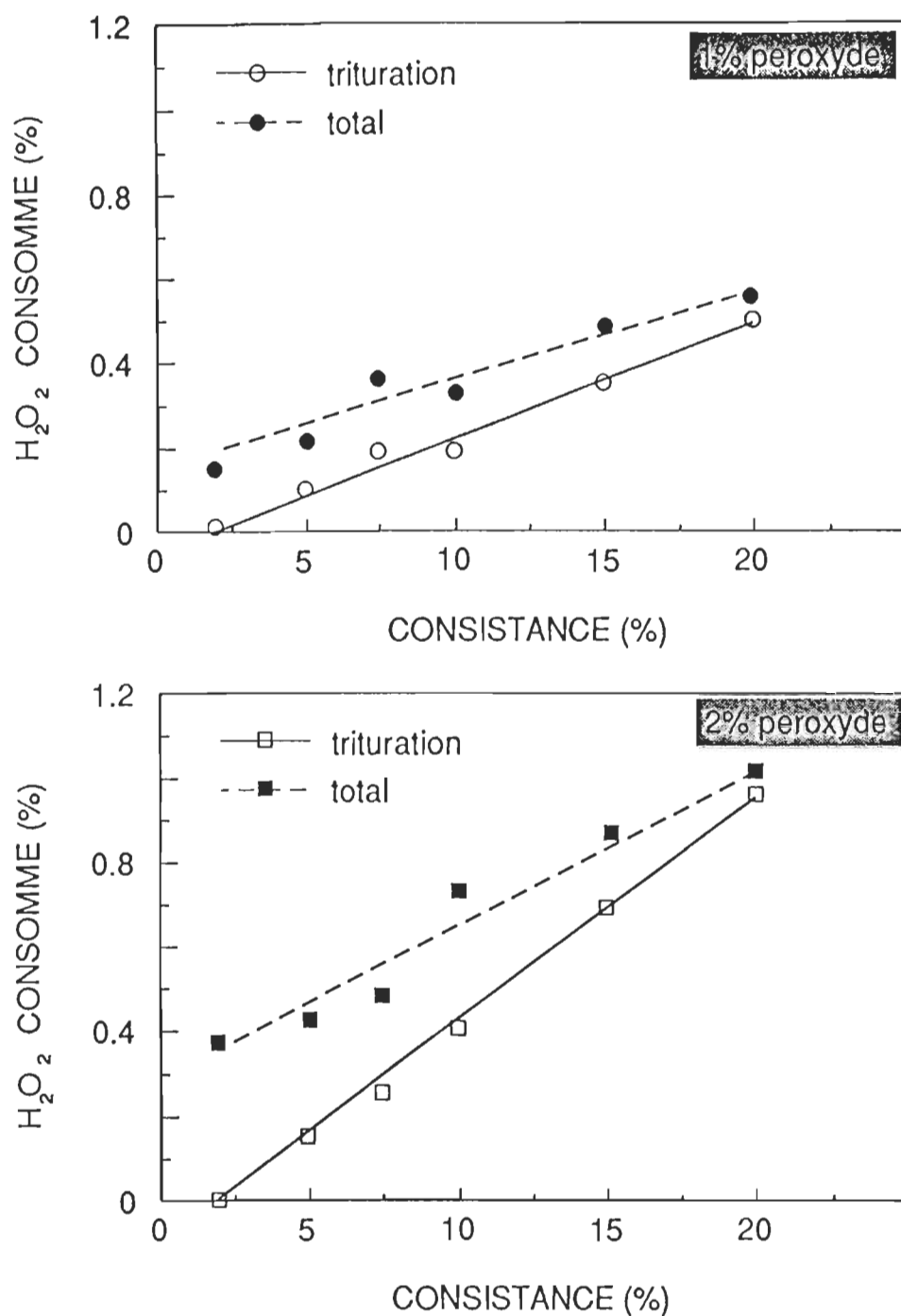


Figure 24: Pourcentage de peroxyde consommé en relation avec la consistance de trituration pour différentes charges de peroxyde d'hydrogène

Elle réduit également la blancheur et la luminosité en diminuant le temps de contact entre la fibre et le peroxyde. De plus, la neutralisation du peroxyde à l'aide du métabisulfite de sodium provoque une hydrolyse des liens cellulodiques c'est-à-dire une coupure des liaisons fibre-à-fibre qui se traduit par une diminution de la longueur de rupture et de l'indice d'éclatement.

Tableau 15: Effet de la neutralisation du peroxyde après l'étape de trituration sur les différentes propriétés de la pâte désencrée

	sans neutralisation		avec neutralisation	
	1	2	1	2
Charge de peroxyde (%)				
Blancheur ISO (%)	61.8	62.8	61.2	61.8
Luminosité (%)	85.7	87.2	84.6	85.3
Coordonnée b*	6.52	6.71	6.13	6.55
Opacité (%)	97.5	97.7	98.1	98.0
Longueur de rupture (km)	4.11	4.07	3.5	3.13
Indice de déchirure (mN*m ² /g)	6.97	7.02	7.14	7.25
Indice d'éclatement (kPa*m ² /g)	2.20	2.12	1.98	1.93

4.2 Comparaison des blanchiments externes au peroxyde et à l'hydrosulfite pour la pâte désencrée

La figure 25 présente le degré de blancheur obtenue avec de la pâte désencrée ayant subi un blanchiment en tour externe au peroxyde ou à l'hydrosulfite. Le blanchiment à l'hydrosulfite est effectué à une consistance de 10% comparativement à 12 et 25% pour le peroxyde. Ces consistances correspondent à celles utilisées industriellement. On remarque que le blanchiment à l'hydrosulfite, bien que la consistance soit plus basse, atteint des blancheurs similaires à celles obtenues avec le peroxyde pour des charges inférieures à 0.5%. Pour des charges supérieures, le peroxyde est évidemment plus efficace. Putz et Götsching (69) ont obtenu des résultats similaires lors du blanchiment d'une pâte désencrée de papier journal.

L'utilisation d'une consistance plus élevée lors du blanchiment au peroxyde (25% vs 12%) permet une légère augmentation des gains de blancheur puisque le peroxyde a un meilleur contact avec la fibre. Ces résultats concordent avec ceux de Heimbürger et Meng (52). De plus, nous constatons que de faibles charges (0.25%) de peroxyde ou d'hydrosulfite sont suffisantes pour atteindre la blancheur désirée (60% ISO).

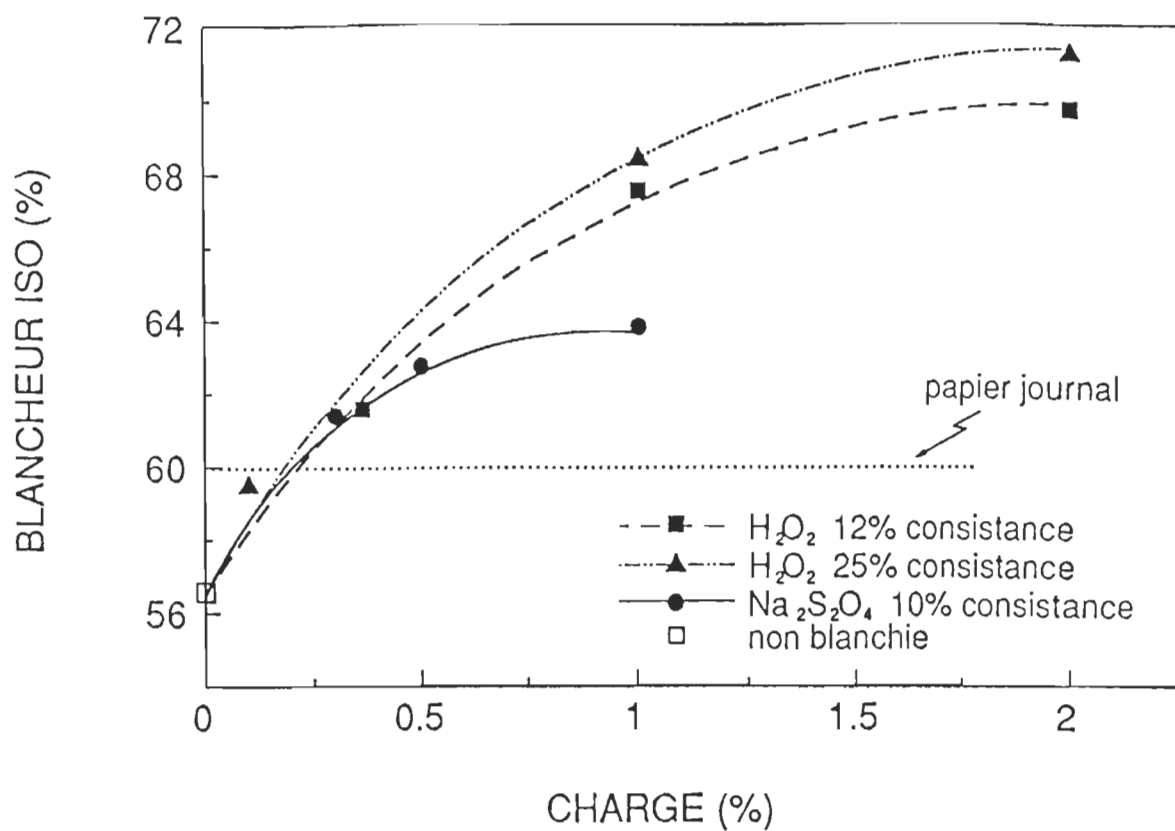


Figure 25: Blancheur du papier en relation avec la concentration des agents de blanchiment utilisés à la tour externe

La figure 26 illustre la relation entre la luminosité (L^*) et la charge des agents de blanchiment oxydant ou réducteur. On constate que la luminosité augmente très rapidement avec de faibles charges de peroxyde ou d'hydrosulfite pour ensuite atteindre un palier. Le peroxyde permet d'atteindre une luminosité plus élevée que l'hydrosulfite. Cependant, la valeur de référence (84%) est atteinte avec les deux agents de blanchiment. Le blanchiment au peroxyde à haute consistance procure des résultats supérieurs.

La figure 27 présente la tendance au jaunissement (coordonnée b^*) en fonction des charges de peroxyde ou d'hydrosulfite. La pâte désencrée non blanchie possède une coordonnée b^* de 6.7 (carré vide). Nous observons que les différentes liqueurs de blanchiments modifient la teinte jaune du papier jusqu'à l'obtention d'une constante. L'utilisation de charges supérieures à la valeur minimale étudiée n'apporte aucun changement.

Lors des blanchiments au peroxyde, l'augmentation de la teinte jaune est due à la liqueur de blanchiment fortement alcaline. Le blanchiment au peroxyde réalisé à une consistance de 25% donne une teinte légèrement inférieure puisque l'alcali est consommé par le peroxyde d'une façon plus importante. Les résiduels de peroxyde contribuent à expliquer ces différences comme le montre le tableau 16.

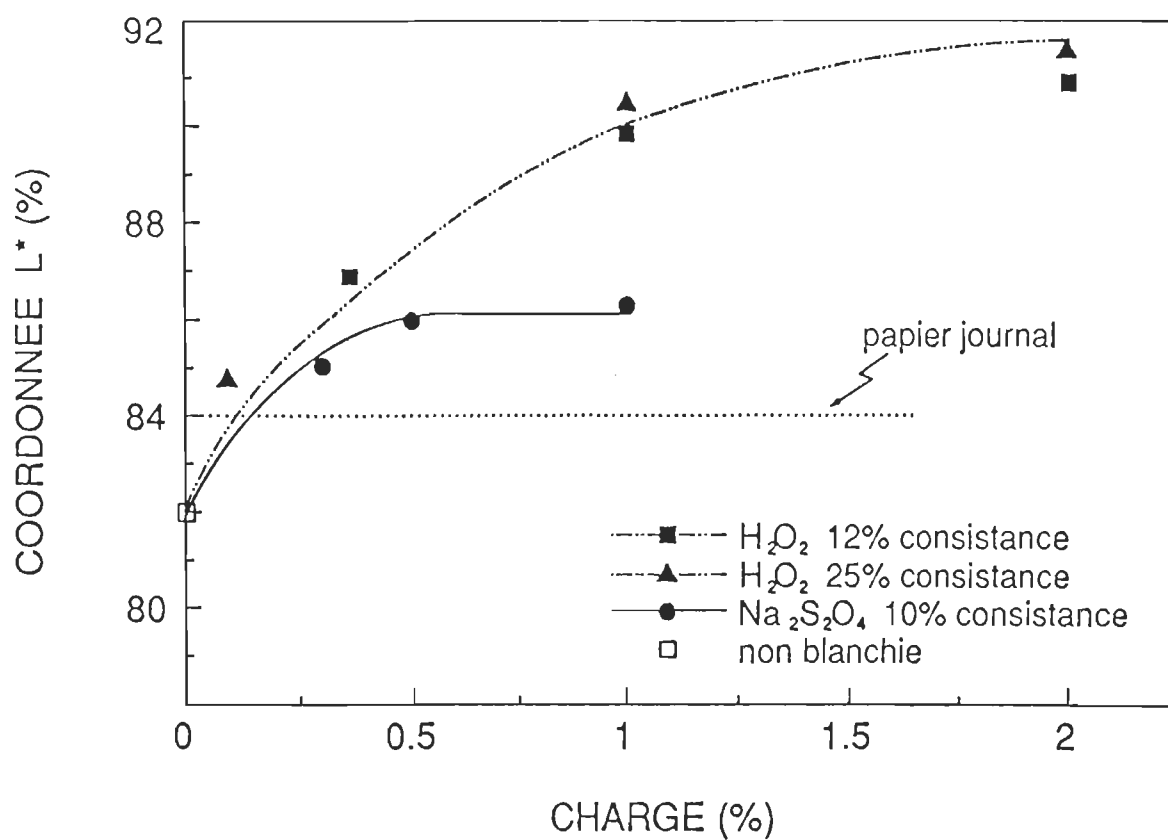


Figure 26: Luminosité (L*) du papier en relation avec la concentration des agents de blanchiment utilisés à la tour externe

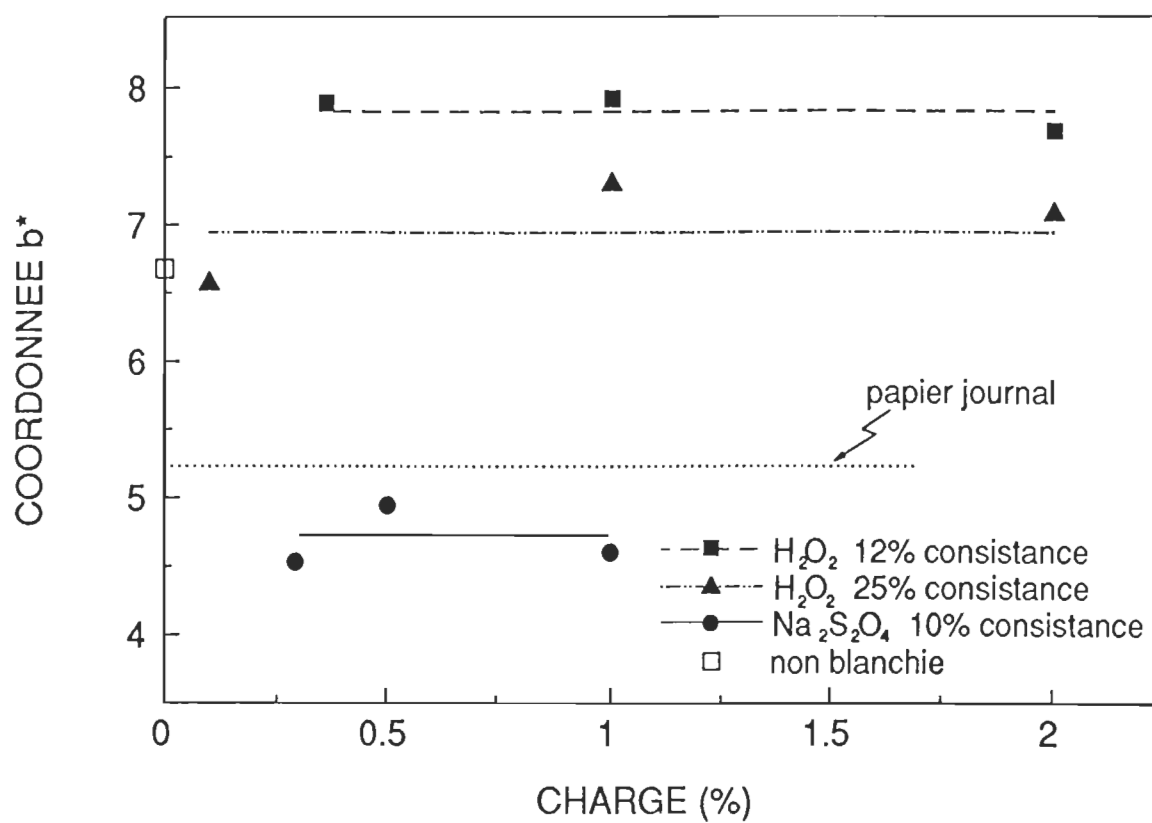


Figure 27: Teinte jaune (coordonnée b^*) du papier en relation avec la concentration des agents de blanchiment utilisés à la tour externe

Tableau 16: Pourcentages de peroxyde résiduel lors des blanchiments au peroxyde pour les deux consistances utilisées

	Résiduel de peroxyde pour 1% appliqué	Résiduel de peroxyde pour 2% appliqué
12% consistance	0.35%	0.65%
25% consistance	0.23%	0.42%

L'utilisation de l'alcali total optimum des pâtes mécaniques de 1.2% peut être à l'origine du jaunissement. Joachimides et Hache (50) suggèrent un alcali de 0.85% dans le cas d'une pâte désencrée produite par flottation. Cependant, Ceuster et Carman (45) indiquent que l'optimum varie avec la composition des vieux papiers. Nous avons décidé d'utiliser l'alcali des pâtes mécaniques puisque l'effet de la composition des vieux papiers n'est pas encore totalement élucidé. En contrepartie, l'emploi d'un alcali supérieur permet d'obtenir des gains de blancheurs et de luminosité deux fois et demie supérieurs à ceux obtenus dans les travaux de Joachimides et Hache (50).

Lors du blanchiment à l'hydrosulfite, la chute de la teinte jaune est reliée à la présence d'hydrosulfite et à l'acidification du milieu. Ainsi, on abaisse la teinte jaune sous la valeur de référence.

La figure 28 montre l'effet du blanchiment au peroxyde ou à l'hydrosulfite sur l'opacité. Nous remarquons une opacité relativement constante lorsque la pâte désencrée est blanchie à l'aide de l'hydrosulfite. Cependant, la diminution de l'opacité est significative lorsque cette pâte est blanchie à l'aide du peroxyde. Les deux consistances utilisées lors du blanchiment au peroxyde montrent sensiblement la même diminution d'opacité. L'origine de cette diminution est la solubilisation des fines en milieu alcalin. Ces résultats se comparent à ceux d'une pâte thermomécanique blanchie avec le peroxyde d'hydrogène (70). La pâte désencrée non blanchie a une opacité (98.6%) supérieure au papier journal de référence (96.6%). En effet, la présence d'encres résiduelles et l'élimination de longues fibres lors de la flottation rendent le papier plus opaque.

La figure 29 indique l'impact de la charge des agents de blanchiment sur la longueur de rupture. Nous observons que la longueur de rupture augmente en fonction de la charge de l'agent de blanchiment peu importe le produit ou la consistance utilisés. Le blanchiment augmente le nombre de liens possibles entre les fibres par une modification des groupements et entraîne une augmentation de la longueur de rupture de cette pâte puisque le nombre de liens expliquent en grande partie la variation de la longueur de rupture. De plus, nous constatons que la pâte désencrée non blanchie a une longueur de rupture inférieure au papier de référence puisque la flottation élimine une proportion des longues fibres dont

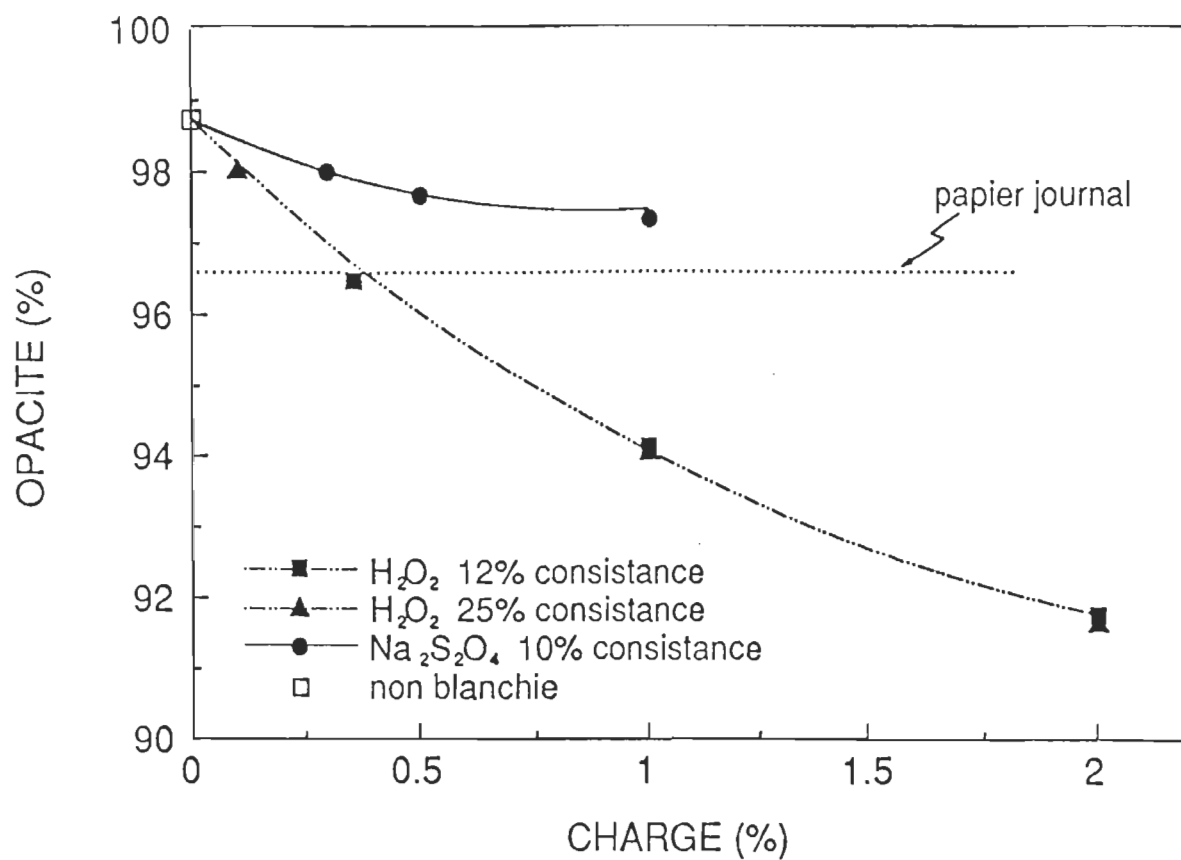


Figure 28: Opacité du papier en relation avec la concentration des agents de blanchiment utilisés à la tour externe

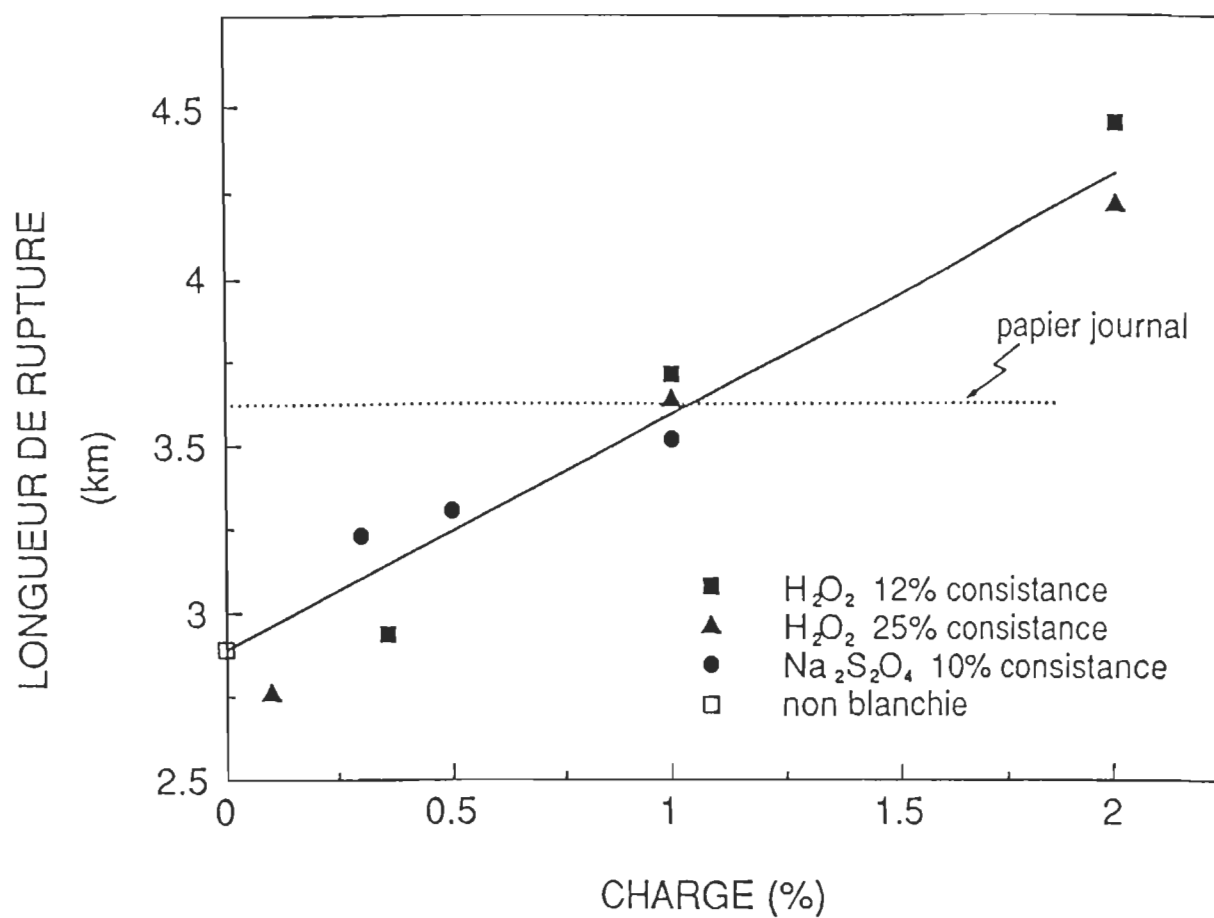


Figure 29: Longueur de rupture du papier en relation avec la concentration des agents de blanchiment utilisés à la tour externe

dépend la longueur de rupture. De manière à atteindre la référence (3.64 km), il faut blanchir la pâte avec une charge minimale de 1% en peroxyde ou en hydrosulfite. La littérature mentionne que les résultats de la longueur de rupture sont grandement influencés par la composition de la matière première (69,70).

Nous observons sur la figure 30 que la pâte désencrée non blanchie a un indice de déchirure inférieur au papier journal de référence. La coupure des fibres lors de la trituration et l'élimination de longues fibres lors de la flottation provoquent la chute de cet indice. Les résultats présentés indiquent que les différents blanchiments n'affectent pas l'indice de déchirure puisque cet indice est expliqué majoritairement par la longueur des fibres qui ne change pas lors du blanchiment. Ces résultats diffèrent de ceux obtenus par Leask et al. (70) pour une pâte thermomécanique blanchie soit avec 1% de peroxyde ou 1% d'hydrosulfite (indice de déchirure augmente).

La figure 31 présente la tendance de l'indice d'éclatement de la pâte désencrée blanchie à l'aide du peroxyde ou de l'hydrosulfite. Une fois désencrée, la pâte possède un indice d'éclatement supérieur au papier de référence. Nous remarquons que l'indice d'éclatement, pour des charges inférieures ou égale à 1% de peroxyde, présente un indice d'éclatement inférieur à la pâte non blanchie (carré vide). Le comportement du blanchiment au peroxyde est le même pour les

deux consistances utilisées. La diminution de cet indice est causée par la solubilisation des fines en milieu alcalin. Pour des charges supérieures, l'indice d'éclatement augmente puisque l'accroissement du nombre de liens entre les fibres annule l'effet de la solubilisation. Dans le cas du blanchiment à l'hydrosulfite, l'indice n'est pas affecté.

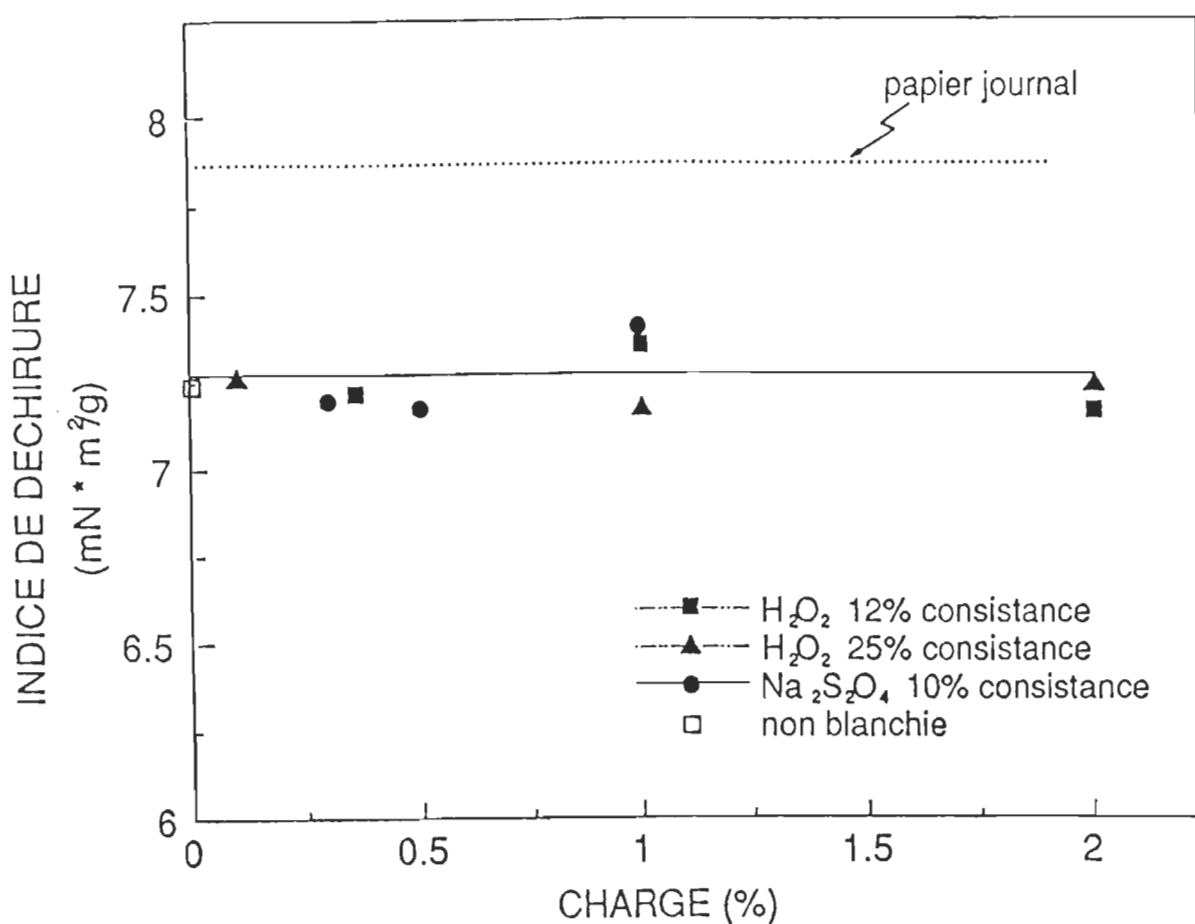


Figure 30: Indice de déchirure du papier en relation avec la concentration des agents de blanchiment utilisés à la tour externe

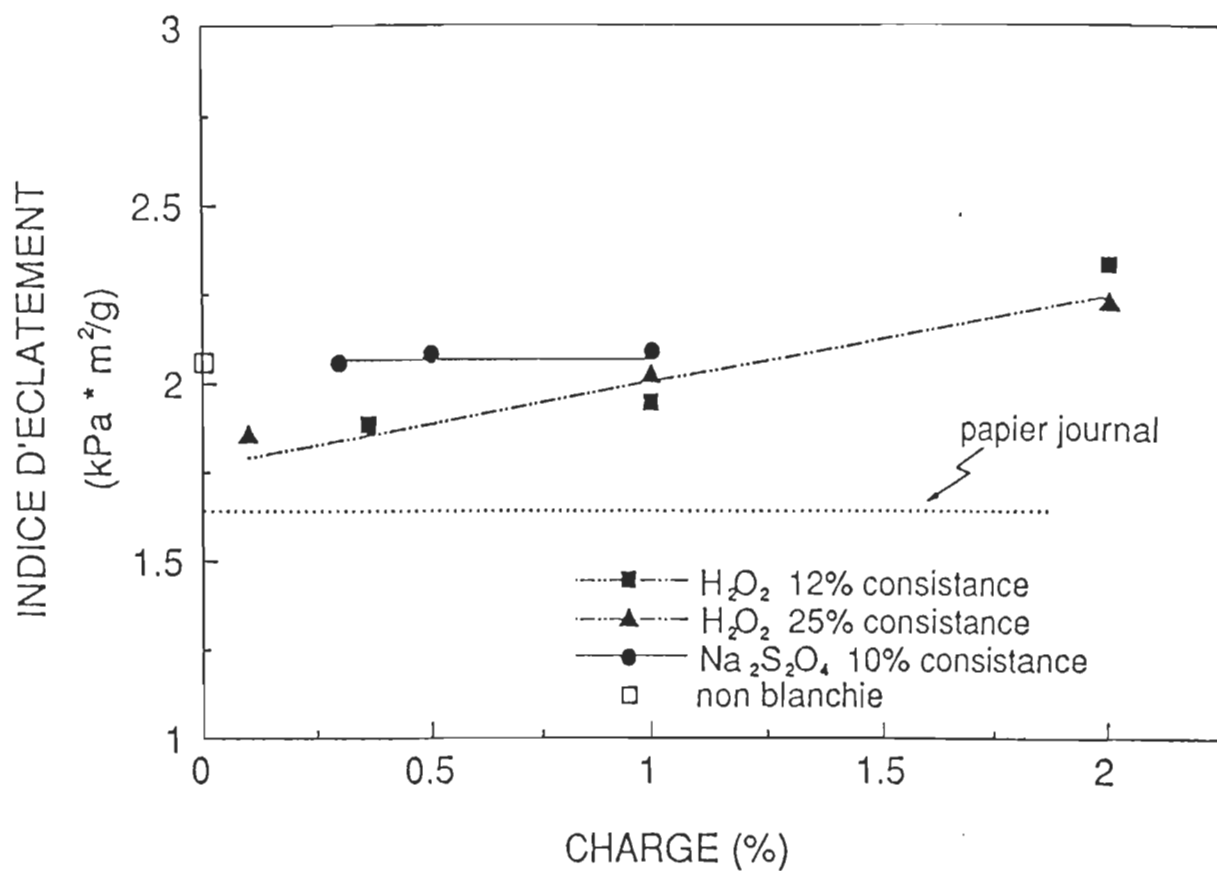


Figure 31: Indice d'éclatement du papier en relation avec la concentration des agents de blanchiment utilisés à la tour externe

4.3 Comparalson entre le blanchiment au tritrateur et celui à tour externe pour le peroxyde d'hydrogène

Les figures 32 et 33 présentent les résultats de blancheur et de luminosité de la pâte désencrée blanchie au tritrateur et à la tour externe à l'aide de deux charges de peroxyde (1 et 2%) à une consistance de 10 et 25% respectivement. Les autres conditions ont été présentées dans les tableaux 9 et 10. Nous constatons que le blanchiment à la tour externe donne des résultats supérieurs puisque le peroxyde est utilisé à des conditions optimales (température, temps et consistance). De plus, la pâte contient moins de contaminants (encres) qui consomment le peroxyde. Les études de Carmichael (7) et Galland (18) sont en accord avec ces résultats. Il est à noter qu'une charge de 1% de peroxyde au tritrateur est suffisante pour l'application envisagée. Des charges supérieures de peroxyde ne permettent pas d'obtenir des augmentations importantes de la blancheur. Si des résultats supérieurs sont nécessaires, il est préférable d'utiliser le blanchiment après désencrage.

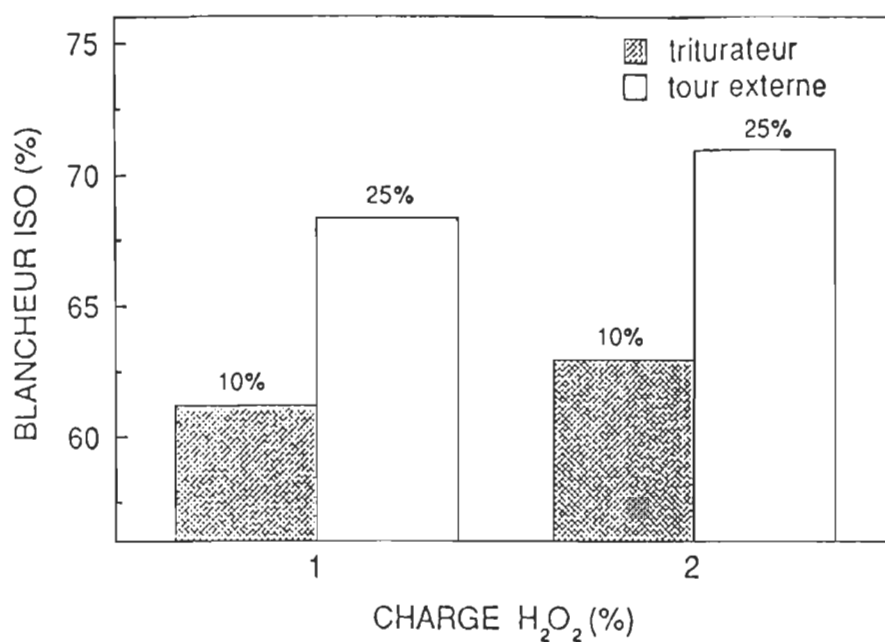


Figure 32: Effet du point d'addition du peroxyde sur la blancheur du papier

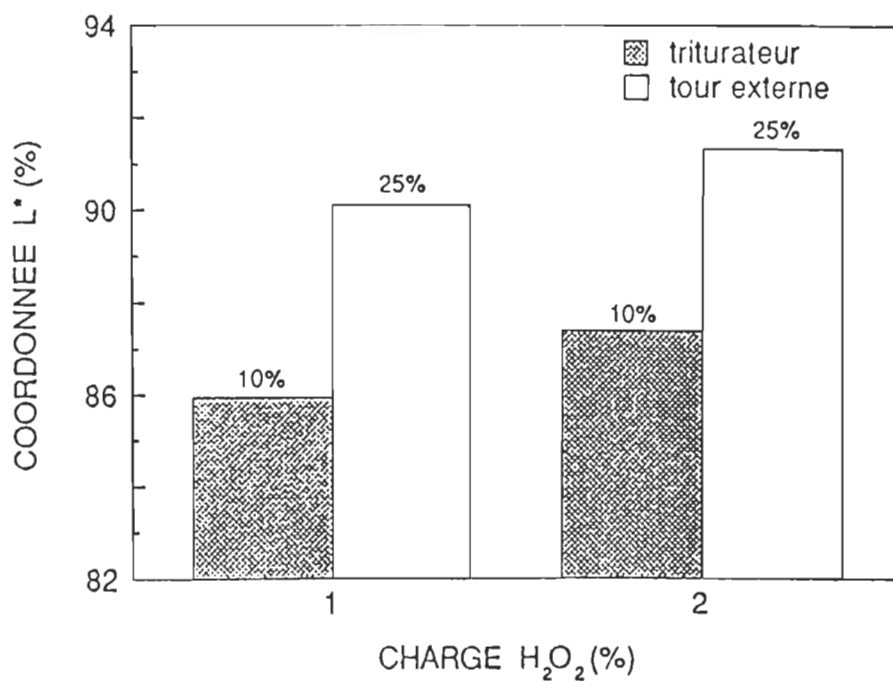


Figure 33: Effet du point d'addition du peroxyde sur la luminosité (L*) du papier

La figure 34 illustre la relation entre la coordonnée b^* et la charge de peroxyde pour les deux points d'addition. Nous observons que la teinte jaune du papier est moins prononcée lorsque nous utilisons 1% de peroxyde au tritrateur. En fait, cette addition de peroxyde prévient le jaunissement excessif. Cependant, une charge supérieure (2%) de peroxyde au tritrateur accroît la teinte jaune. Ce comportement est attribuable aux conditions utilisées qui favorisent la décomposition du peroxyde et entraînent une augmentation de la teinte. Dans le cas du blanchiment à la tour externe, la teinte jaune est pratiquement la même pour les deux charges de peroxyde puisque l'alcali utilisé est trop élevé. De plus, l'absence de peroxyde au tritrateur cause une augmentation de la teinte jaune qui ne peut être récupérée par le blanchiment en tour externe au peroxyde.

A la figure 35, nous comparons l'influence du point d'addition du peroxyde sur l'opacité de la pâte. L'utilisation du peroxyde au tritrateur permet de conserver l'opacité élevée de la pâte désencrée contrairement à son addition à la tour externe. Les conditions plus sévères (température, temps et alcali) lors du blanchiment à la tour externe provoquent une plus grande solubilisation des fines qui conduit à la diminution de l'opacité. Cette diminution est également liée à la charge de peroxyde lors du blanchiment externe.

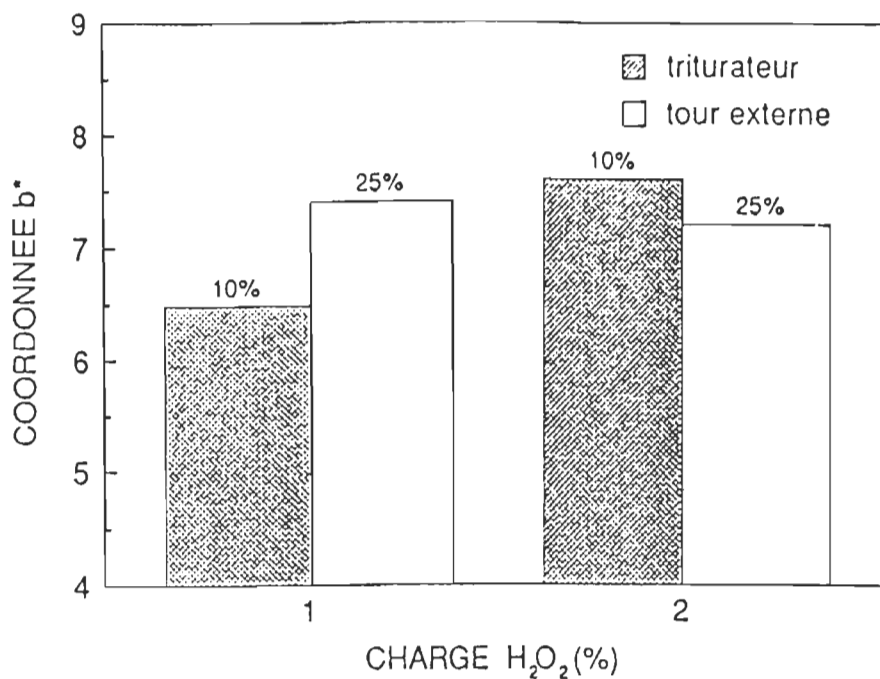


Figure 34: Effet du point d'addition du peroxyde sur la teinte jaune (coordonnée b^*) du papier

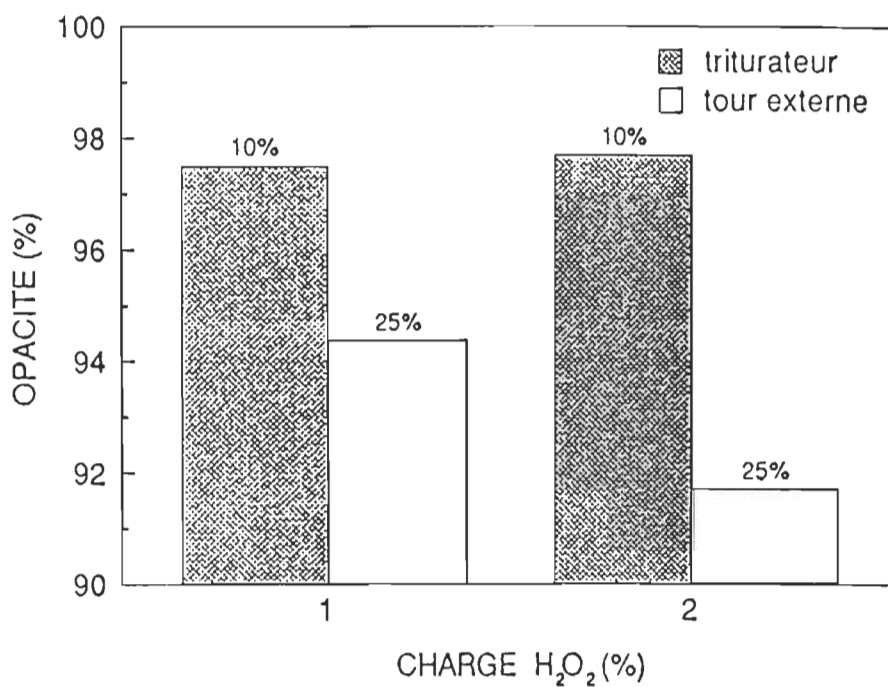


Figure 35: Effet du point d'addition du peroxyde sur l'opacité du papier

A la figure 36, nous retrouvons la longueur de rupture en fonction du type de blanchiment au peroxyde utilisé (tritrateur vs tour externe) pour deux charges différentes. Nous constatons que la charge de peroxyde influence la longueur de rupture obtenue si le blanchiment est réalisé à la tour externe: une augmentation est obtenue. Si le blanchiment est réalisé au tritrateur, une charge supérieure à 1% est inutile puisque la température et le temps de rétention utilisés ne permettent pas au peroxyde d'agir plus efficacement. Ainsi, la valeur obtenue de la longueur de rupture est stable. Le blanchiment réalisé au tritrateur avec 1% de peroxyde montre une longueur de rupture supérieure au blanchiment correspondant à la tour externe. Nous supposons que l'agitation a un effet très important lorsque de faibles charges sont appliquées. Elle améliore le contact peroxyde/fibres et, par le fait même, le développement des zones de contact fibre/fibre.

La figure 37 compare la relation entre le blanchiment au peroxyde à la tour externe avec celui au tritrateur pour l'indice de déchirure. Nous observons que les résultats sont légèrement supérieurs lorsque le blanchiment est réalisé à la tour externe. En effet, le blanchiment externe entraîne une plus grande solubilisation des fines que lors du blanchiment au tritrateur. De plus, la filtration supplémentaire que nécessite le blanchiment externe apporte une perte

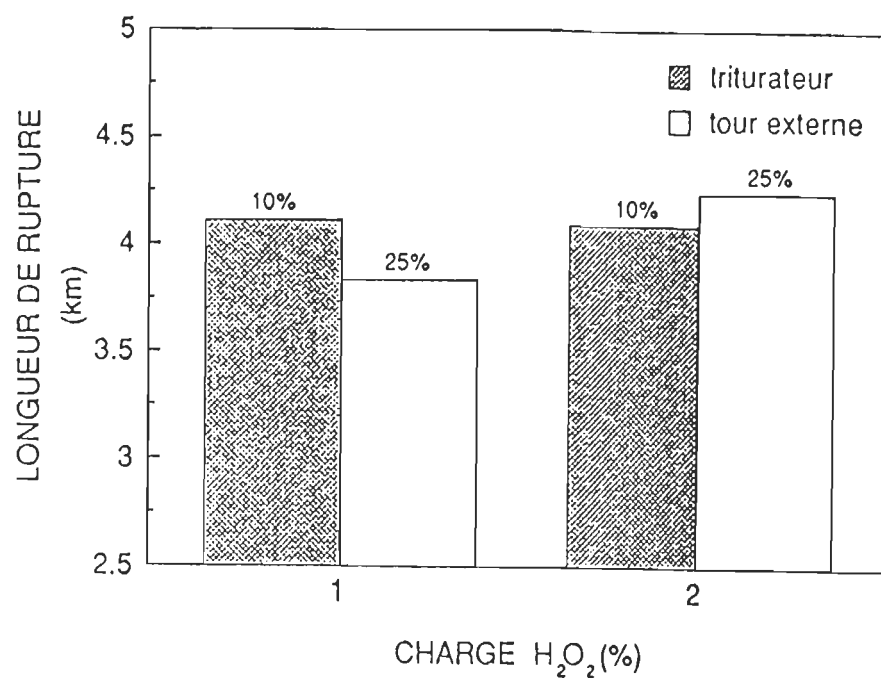


Figure 36: Effet du point d'addition du peroxyde sur la longueur de rupture du

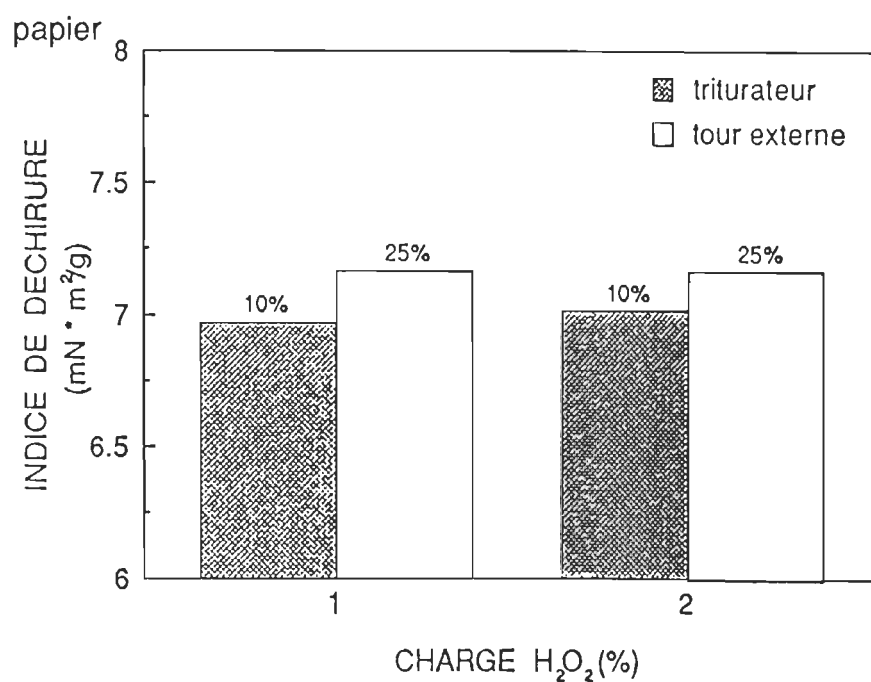


Figure 37: Effet du point d'addition du peroxyde sur l'indice de déchirure du papier

additionnelle de fines. Il en résulte une augmentation de l'indice de déchirure puisque la proportion de fibres longues augmente.

La figure 38 présente les indices d'éclatement obtenus lors des blanchiments au peroxyde effectués à la tour externe et au triturateur. Nous constatons que le profil de l'indice d'éclatement est semblable à celui obtenu pour la longueur de rupture (figure 36). En effet, ces deux propriétés sont proportionnelles aux nombres de liens interfibres et à la longueur des fibres (71).

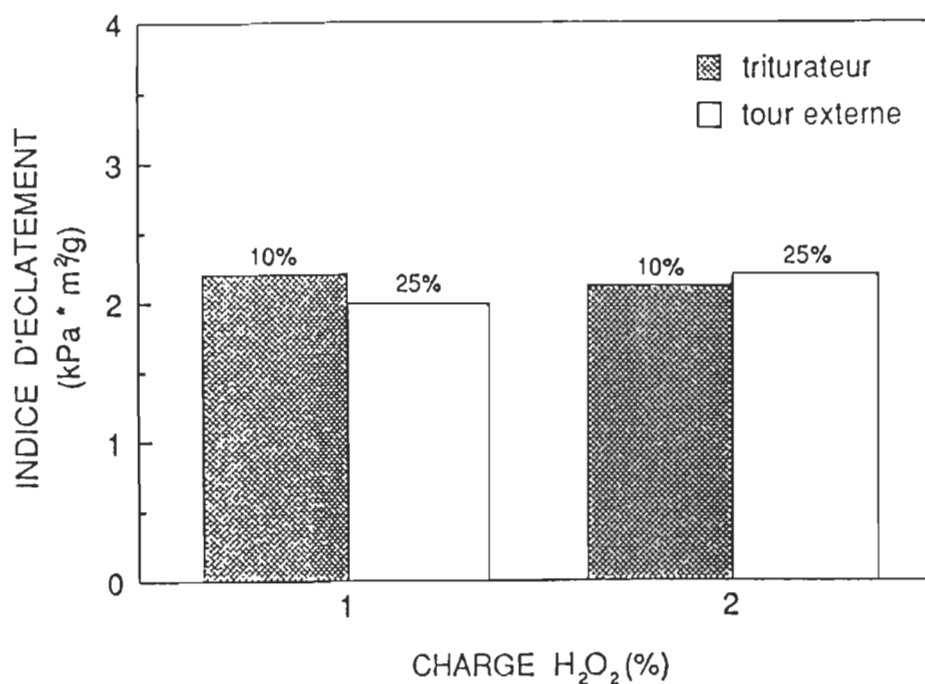


Figure 38: Effet du point d'addition du peroxyde sur l'indice d'éclatement du papier

4.4 Comparaisons des différents coûts de blanchiment

Dans les sections précédentes, nous avons discuté de la localisation et du type de blanchiment sur les propriétés de la pâte désencrée. Les résultats obtenus sont utilisés comme critères de décision (qualitatifs). Cependant, l'aspect économique est un critère fort important. Dans cette section, nous discuterons de ce critère de décision quantitatif. Les coûts unitaires des produits chimiques utilisés sont tirés de "Chemical Marketing Reporter 1992" et sont présentés dans le tableau 17.

Les trois types de blanchiments que nous évaluerons sont:

- Le blanchiment réalisé lors de la trituration à l'aide du peroxyde à 10% de consistance.
- Le blanchiment réalisé après le cycle de désencrage à l'aide du peroxyde dans une tour externe à 25% de consistance.
- Le blanchiment réalisé après le cycle de désencrage à l'aide de l'hydrosulfite dans une tour externe à 10% de consistance.

Tableau 17: Coûts unitaires des produits chimiques

Produits	Coût unitaire \$US/lb	Coût unitaire \$CAN/kg
Silicate de sodium (41°Be)	0.0825	0.2137
Sulfate de magnésium	0.1600	0.4144
Hydroxyde de sodium à 50%	0.1575	0.4080
Diéthylène triamine penta acétate de sodium	0.5100	1.3211
Peroxyde d'hydrogène à 50%	0.3425	0.8872
Hydrosulfite de sodium	0.6650	1.7226

Source: Chemical Marketing Reporter (20 janvier 1992)

Le tableau 18 présente les charges de chacun des produits considérés pour blanchir la pâte désencrée de papier journal de 56% à 60% ainsi que le coût en produits chimiques pour une tonne métrique de papier séché à l'air. La quantité d'acide sulfurique utilisé pour l'ajustement du pH lors du blanchiment à l'hydrosulfite n'est pas incluse dans le coût mentionné. La neutralisation du peroxyde est effectuée seulement lors du blanchiment externe. Le coût résultant de cette neutralisation n'est pas calculé puisqu'elle n'est pas réalisé avec le métabisulfite de sodium en usine. C'est le SO_2 que l'on utilise habituellement. De plus, l'usine peut ne pas neutraliser le peroxyde résiduel mais abaisser le pH de la pâte ou recirculer le peroxyde.

Tableau 18: Coûts en produits chimiques et pourcentage des composants des différents blanchiments pour une même blancheur

Produits	Pourcentage (%)		
	Hydrosulfite	Peroxyde	
	Tour externe	Tour externe	Triturateur
Na_2SiO_3	-	3.0	-
MgSO_4	-	0.05	-
DTPA	0.4	0.4	0.4
NaOH	-	0.768	-
H_2O_2	-	0.25	0.75
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$	0.25	-	-
Coût (\$CAN/Tmsa) Blancheur 60% ISO	9.59	22.61	18.60

Nous constatons, pour une blancheur de 60% ISO, que le blanchiment à l'hydrosulfite est le plus économique (\$9.59/Tmsa). Pour obtenir une blancheur similaire à l'aide du peroxyde, le coût en produits chimiques est de \$18.60/Tmsa au triturateur et de \$22.61/Tmsa à la tour externe. Le coût du blanchiment au peroxyde réalisé à la trituration est inférieur à celui réalisé à la tour externe puisque l'alcali est fourni par la formulation de désencrage. C'est pourquoi, nous ne considérons que le prix du séquestrant et du peroxyde dans le coût du blanchiment au triturateur.

A l'intérieur du tableau 19, nous retrouvons le coût en produits chimiques du blanchiment et le pourcentage des composants en fonction du gain de blancheur de la pâte désencrée pour une même charge (1%) d'agent de blanchiment.

Tableau 19: Coûts en produits chimiques et pourcentage des composants des différents blanchiments pour une même charge de peroxyde ou d'hydrosulfite

Produits	Pourcentage (%)		
	Hydrosulfite	Peroxyde	
	Tour externe	Tour externe	Triturateur
Na_2SiO_3	-	3.0	-
MgSO_4	-	0.05	-
DTPA	0.4	0.4	0.4
NaOH	-	0.864	-
H_2O_2	-	1.0	1.0
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$	1.0	-	-
Coût (\$CAN/Tmsa)	22.52	36.71	23.04
Blancheur ISO (%)	63.8	68.5	61.8
Gain de blancheur	7.5	12.2	5.5
Coût par point de blancheur (\$CAN/Tmsa)	3.00	3.01	4.19

Nous remarquons que les blanchiments réalisés à la tour externe ont des coûts équivalents par point de blancheur (\$3.00/Tmsa). Cependant, le blanchiment au peroxyde à la tour externe permet d'obtenir des blancheurs supérieures. Une étude réalisée par Joachimides et Hache (50) sur le blanchiment de la pâte désencrée présente des résultats du même ordre de grandeur. Nous observons que le blanchiment au peroxyde réalisé au tritrateur coûte environ \$1.19 de plus par point de blancheur.

Cependant, les blanchiments réalisés à la tour externe nécessitent des coûts supplémentaires (investissement, main-d'oeuvre, énergie, etc...). Le tableau 20 présente les dépenses engendrées par de telles installations. Les coûts associés aux produits chimiques sont tirés du tableau 18 et sont en fonction d'une production annuelle de l'ordre de 120 000 tonnes par année. Nous constatons qu'une installation de blanchiment au peroxyde est beaucoup trop dispendieuse pour la qualité de pâte souhaitée.

Le tableau 21 présente les deux alternatives justifiables économiquement. Il s'agit d'un blanchiment réalisé au tritrateur à l'aide du peroxyde et d'un blanchiment réalisé à la tour externe à l'aide de l'hydrosulfite. Pour les coûts de blanchiment à l'hydrosulfite, nous utilisons comme investissement la valeur centrale c'est-à-dire \$1.5 millions.

Tableau 20: Coûts d'investissement et d'opération estimés des blanchiments de la pâte désencrée pour papier journal à une blancheur de 60% ISO

Coûts	Hydrosulfite	Peroxyde
Investissement (\$)	1-2 millions	4-6 millions
Production (Tmsa/année)	120000	120000
Produits chimiques (\$)	1,150,800	2,713,200
Main-d'oeuvre (\$)	-	235,000
Entretien (\$)	30,000	160,000
Electricité (Kwh/Tm) (\$0.022/Kwh) (\$)	5	35
	13,200	92,400
Dépenses annuelles (\$)	1,194,000	3,200,600

Source: TAPPI Pulping Conference, Toronto, pp. 291-297, (1990)

Tableau 21: Coûts des alternatives

Coûts	Blanchiment au tritrateur à l'aide du peroxyde	Blanchiment externe à l'aide de l'hydrosulfite
Investissement (\$)	-	1,500,000
Dépenses annuelles (\$)	2,232,000	1,194,000

Pour un taux interne de rendement à 20%, les coûts engendrés par le blanchiment externe à l'hydrosulfite sont moins onéreux que ceux du blanchiment au tritrateur

avec le peroxyde si ces coûts sont répartis sur une période de deux ans et plus. Le tableau 22 présente les différentes situations. La partie de gauche de l'équation 23 représente les coûts du blanchiment au triturateur avec le peroxyde et la partie de droite, les coûts du blanchiment externe à l'hydrosulfite. Pour que le blanchiment externe à l'hydrosulfite soit retenu, il faut que les coûts par année (annuités) soient inférieurs à ceux du blanchiment au triturateur avec le peroxyde.

$$2,323,000 > 1,194,000 + 1,500,000 (A/P, 20, n) \quad (23)$$

Tableau 22: Coûts des deux alternatives répartis sur "n" années

Années "n"	Coût/an du blanchiment au triturateur avec le peroxyde	Coût/an du blanchiment externe à l'hydrosulfite	Choix
1	2,232,000	2,994,000	triturateur avec peroxyde
2	2,232,000	2,175,750	tour externe avec hydrosulfite
3	2,232,000	1,906,050	tour externe avec hydrosulfite

Si nous fixons le taux de rendement minimum acceptable à 20% et la période d'étude sur dix ans, nous constatons que les coûts additionnels pour l'installation de blanchiment à l'hydrosulfite est justifiée puisque le taux interne de rendement

(69%) est supérieur au taux de rendement minimum acceptable. La période d'étude est fixée selon le cycle papetier habituel de dix ans. Ainsi, le blanchiment réalisé à la tour externe avec l'hydrosulfite est préférable à celui au tritrateur avec le peroxyde du point de vue économique.

5- CONCLUSION

L'utilisation du peroxyde lors de la trituration à haute consistance a permis d'obtenir une pâte désencrée de papier journal comparable à celle utilisée dans la fabrication du journal Le Nouvelliste de Trois-Rivières. Les résultats les plus intéressants sont obtenus avec une charge de peroxyde de 1% à une consistance de trituration de 10%. Une consistance et une charge supérieures ne sont pas justifiées par les résultats obtenus. La coordonnée b^* (teinte jaune) et l'indice de déchirure sont les deux critères qui ne rencontrent pas nos exigences.

La neutralisation du peroxyde après l'étape de trituration diminue peu la teinte jaune du papier. Elle a des effets néfastes sur la blancheur, la luminosité, la longueur de rupture et l'indice d'éclatement.

L'analyse des propriétés montre que le blanchiment externe au peroxyde de la pâte désencrée apporte 8 points de blancheur et 4 points de luminosité de plus que le blanchiment au tritrateur à 10% de consistance. Le blanchiment à l'hydrosulfite donne une blancheur de 3 points supérieurs et abaisse la teinte jaune du papier de 6.7 à 4.7.

Le blanchiment externe au peroxyde a l'inconvénient de diminuer l'opacité de 98.7 à 92.0%, par contre, toutes les autres propriétés sont pratiquement identiques.

Du point de vue économique, le blanchiment externe à l'hydrosulfite est le moins dispendieux suivi du blanchiment au triturateur. Le blanchiment externe au peroxyde entraîne des coûts élevés qui ne sont pas justifiés pour la qualité de pâte produite. Les critères de sélection qualitatifs (propriétés) et quantitatifs (coûts) montrent que le blanchiment externe à l'hydrosulfite est la meilleure façon de blanchir la pâte désencrée utilisée pour la fabrication du papier journal.

Pour la poursuite de ce travail, nous recommandons:

- 1) D'étudier le blanchiment au triturateur avec des conditions se rapprochant d'un blanchiment conventionnel.
- 2) D'optimiser l'alcali total à utiliser lors du blanchiment à l'aide du peroxyde au triturateur.
- 3) D'effectuer des études sur la réversion et sur l'effet du séchage.

6- REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Mullinder, J., "La crise de l'entreposage des déchets donne un nouvel élan au recyclage", *Journal des Pâtes et Papiers*, 13-17, (janvier/février 1990).
2. Anonyme, "Moi, mes souliers ont beaucoup...", *Le Papetier*, 25 (3); 3-5 (1989).
3. Claydon, P., "Recycled fibre: The major furnish component in quality newsprint production", *Pulp and Paper Canada*, 91 (12); 135-140 (1990).
4. Papageorges, G., DeCeuster, J., "The use of hydrogen peroxide in waste paper recycling", *Chemical Age of India*, 27 (5); 451-464 (1976).
5. Galland, G., Bernard, E., Sauret, G., "Contribution à l'étude physico-chimique du désencrage", *ATIP*, 30 (2); 47-55 (1976).
6. Anonyme, "Le point sur...", Centre Technique du Papier, Grenoble, France, Doc. No 5 (janvier/février/mars 1983).
7. Carmichael, D.L., "The use of hydrogen peroxide in the de-inking of newsprint", *Pulp and Paper Canada*, 91 (10); T365-T368 (1990).
8. Galland, G., Bernard, E., Sauret, G., "Aspects physico-chimiques du désencrage", *ATIP*, 31 (10); 364-378 (1977).
9. Altieri, A.M., Wendell, J.W., "Deinking of wastepaper", TAPPI Monograph 31, chap.1, 1-9 (1967).
10. Galland, G., Cohard, D., Vernac, Y., "Travaux du Centre Technique du Papier dans le domaine du désencrage", Centre Technique du Papier, Grenoble, France, Doc. No 1030, (1981).
11. Howard, R.C., "The effects of recycling on paper quality", *Journal of Pulp and Paper Science*, 16 (5); J143-J149 (1990).
12. Altieri, A.M. et al, "Deinking of waste paper", TAPPI Monograph 16, chap. 6, 58-79 (1956).

13. Rapport confidentiel de KSH.
14. Galland, G., "Désencrage par flottation des papiers imprimés", Centre Technique du Papier, Grenoble, France, Doc. No 1091, (décembre 1982).
15. Read, B., "Deinking chemicals and their effects", PIRA Symposium Chemicals in Papermaking, (février 1986).
16. Sainniemi, J., Sundman, F., Venho, J., "Fibreflow: A new continuous methods for the removal of contraries and recovery of fibres from waste paper", EUCEPA Bratislava, 27-30 (septembre 1976).
17. Putz, H.-J., Göttching, L., "Bleaching of the waste paper", TAPPI Seminar, Contaminant Problems and Strategies in Wastepaper Recycling, 47-61 (1989).
18. Galland, G., Bernard, E., Sauret, G., "Contribution à l'amélioration du désencrage. Intérêt des traitements hautes concentrations", EUCEPA Praha, 167-177 (1983).
19. Eul, W.L., Süss, H.U., "Recent developments in bleaching processes for sophisticated deinking systems", The Pira Secondary Fibre Programme, 2 (18); 1-18 (1989).
20. Hamilton, F., Leopold, B., "Secondary fibers and non-wood pulping", TAPPI, Pulp and Paper Manufacture, 3 (16); 179-188 (1987).
21. Bernard, E., "Désencrage: nouveaux procédés", ATIP, 33 (9); 430-440 (1979).
22. Merriman, K., "The removal of contaminants from recycled fibre using centrifugal cleaners: Theory, applications and mill practice", Recycling and deinking of newsprint and fine papers course, CPPA, Toronto, (février 1991).
23. Anonyme, "Le recyclage des fibres secondaires par l'industrie papetière au Québec", Division des études industrielles, Ministère de l'Energie et des Ressources du Québec, (mars 1988).
24. Paraskevas, S., "Ink removal-various proceeding methods and their effectiveness", TAPPI Seminar, Contaminant Problems and Strategies in Wastepaper Recycling, 41-44 (avril 1990).
25. Andersson, A., Bunce, P.G., Lindqvist, M., "Mechanisms and effects of deinking chemistry", The Pira Secondary Fibre Programme, 2 (21); 1-11 (1989).

26. Anonyme, "Hydrogen peroxide: application in deinking processes", Degussa, Germany (1989).
27. Hanson, J.P., "Georgia-Pacific opts for flotation deinking", *Pulp and Paper International*, 19 (9); 68-70 (1977).
28. Iwasaki, M., "Various problems and technological trends of wastepaper reclamation", *Japan Pulp and Paper*, 28 (3); 35-45 (1990).
29. Rangamannar, G., Silveri, L., Karneth, A., "The effect of printing on recycling", TAPPI, International Printing and Graphic Arts Conference, 37-42 (novembre 1990).
30. Kindron, R.R., DeCeuster, J., "Hydrogen peroxide use benefits", *Pulp and Paper*, 55 (7); 176-180 (1981).
31. Marchildon, L., Daneault, C., Lapointe, M., "Pâte désencrée pour papier journal de qualité égale à la pâte vierge sans tour de blanchiment", *Conférence Technologique Estivale, Pointe-au-Pic*, 77-82 (juin 1990).
32. Singh, R.P., "Bleaching practices for different pulp types", TAPPI, Bleaching of Pulps, 297-326 (1979).
33. Helmling, O., Süß, H.U., Eul, W., "Upgrading of waste paper with hydrogen peroxide", *TAPPI Pulping Conference*, 2, 407-417 (1986).
34. Heimbürger, S.A., "Repulping/deinking and bleaching secondary fiber with H₂O₂", *TAPPI Pulping Conference*, 3, 505-515 (novembre 1987).
35. Kindron, R.R., "Hydrogen peroxide: it carries a heavier production work load in today's pulp mill", *Paper Trade Journal*, 1 (15); 32-36 (1978).
36. Bourson, L., "Le peroxyde d'hydrogène dans la fabrication et le blanchiment des pâtes à papier", *Papier, Carton et Cellulose*, 29 (3); 92-98 (1980).
37. DeCeuster, J., Papageorges, G., "Physicochemical aspects of waste paper deinking by washing", *APPITA*, 35 (2); 145-148 (1981).
38. McCormick, D., "Chemistry of flotation and washing for deinking newsprint. Introduction to deink process chemistry", *TAPPI Pulping Conference*, 357-364 (1990).

39. Ali, T., Evans, T.D., Fairbank, M.G., McArthur, D., Whiting, P., "The role of silicate in peroxide brightening of mechanical pulp. Part VI: Interactions of silicate and papermaking polymers", *Journal of Pulp and Paper Science*, 16 (6); J169-J172 (1990).
40. Meyer, K.A., Kappel, J., Petschauer, F., "Criteria for the selection of optimum bleaching systems for mechanical pulp", *TAPPI Pulping Conference*, 291-297 (1990).
41. Michalowski, R.J., Christiansen, S.H., Basciano, C.R., "New system allows silicate-free bleaching of mechanical pulps", *TAPPI Pulping Conference*, 367-380 (1988).
42. Casey, J.-P., "Pulping and Bleaching", *Pulp and Paper: Chemistry and chemical technology*, Vol. 1, 379-392 (1966).
43. Harrison, A., "Chemicals in deinking", *Pulp and Paper*, 65 (4); 39 (1991).
44. McCormick, D., "Chemistry of flotation and washing for deinking newsprint. Part II: Particle interactions and systems", *TAPPI Papermakers Conference*, 141-155 (1991).
45. DeCeuster, J., Carman, G., "Hydrogen peroxide bleaching in waste paper recycling", *Paper technology and Industry*, 18 (4); 126-132 (1977).
46. Basciano, C.R., Heimbürger, S.A., "Importance of chemical pretreatment on the hydrogen peroxide brightening of mechanical pulps", *TAPPI Pulping Conference*, 657-668 (1989).
47. Linck, E., Matzke, W., Siewert, W., "Le circuit de désencrage des vieux papiers", *EUCEPA Symposium*, Ljubljana, 2, 361-378 (octobre 1989).
48. Putz, H.-J., Götsching, L., "Waste paper utilization in the Federal Republic of Germany with special reference to deinking and bleaching", *Paper Southern Africa*, 10-31 (janvier 1985).
49. Dodson, M., Dean, L., "Proper deinking chemistry, bleaching technique crucial to pulp brightness", *Pulp and Paper*, 64 (9); 190-193 (1990).
50. Joachimides, T., Hache, M., "Bleaching deinking pulps" *TAPPI Pulping Conference*, 507-515 (1990).

51. Matzke, W.H., Selder, H.H., "Various approaches for understanding and improving secondary fiber brightness", TAPPI Pulping Conference, 1, 203-211 (octobre/novembre 1988).
52. Heimbürger, S.A., Meng, t., "Bleaching of deinked stock grades", TAPPI International Mechanical Pulping Conference, 329-340 (1991).
53. Bovin, A., "Improved flotation deinking by development of the air mixing chamber", TAPPI Pulping Conference, 1, 37-42 (1984).
54. Vautier, F., Bever, V., "Chemical upgrading of waste paper", The Pira Secondary Fibre Programme, 1 (5); 1-7 (février/mars 1989).
55. Gagné, C., Barbe, M.C., Rémillard, B., Lapointe, M., "Properties of mechanical and chemi-mechanical Jack Pine Pulps. Part IV: Bleaching studies", Pulp and Paper Canada, 91 (6); T221-T230 (juin 1990).
56. Anonyme, "Hydrogen peroxide: application for mechanical pulp bleaching", Degussa, Germany (1989).
57. Andrews, D.H., "The bleaching of mechanical pulps part I: bleaching theory", TECH'82 Mechanical Pulping Course, 195-200 (1982).
58. Lachenal, D., "H₂O₂ as a bleaching and delignifying agent", Workshop on Emerging Pulping and Chlorine-free Bleaching Technologies, Raleigh, Caroline du Nord (mars 1991).
59. Colodette, J., Fairbank, M.G., Whiting, P., "The effect of control on peroxide brightening of stonegroundwood pulp", 75th Meeting Technical Section, CPPA, B45-B49 (1989).
60. Anonyme, "Hydrogen peroxide: Bleaching of mechanical pulps", Interlox (1988).
61. Leduc, C., "Blancheur et couleur des pâtes chimicothermomécaniques: une comparaison de séquences de blanchiment oxydantes et réductrices en plusieurs stades et l'effet de colorant et d'azurage optique", Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Trois-Rivières, (1990).
62. Colodette, J.L., Rothenberg, S., Dence, C.W., "Factors affecting hydrogen peroxide stability in the brightening of mechanical and chemimechanical pulps. Part I: Hydrogen peroxide stability in absence of stabilizing systems", Journal of Pulp and Paper Science, 14 (6); J126-J132 (1988).

63. Beeman, L.A. et al, "The bleaching of pulp", TAPPI Monograph 10, chap. 12, 219-230 (1953).
64. Burton, J.T., Campbell, L.L., Donnini, G.P., "Improving hydrogen peroxide bleaching of mechanical pulp: The effect of silicate dose and other additives", *Pulp and Paper Canada*, 88 (6); T224-T227 (1987).
65. Berger, M.I., Meier, J., Süss, H.U., Schmidt, K., "Two-stage peroxide bleaching. Method of choice for mechanical pulps", *TAPPI Pulping Conference*, 249-259 (1989).
66. Brauer, P., Resch, F., Kappel, J., "New operating experience in high-consistency peroxide bleaching", *TAPPI Pulping Conference*, 299-306 (1990).
67. McArthur, D.M., Willoughby, A.E., Baldwin, S.H., Whiting, P., "Medium consistency hydrosulphite brightening of mechanical pulp", *TAPPI Pulping Conference*, 575-582 (1986).
68. Savard, J.G., "Statistiques", Les Editions HRW Ltée, 13-15 et 279-302 (1978).
69. Putz, H.J., Götsching, L., "Entwicklung physikalischer eigenschaften bei flotation-deinking verschiedener altpapiere und bleiche in kombination mit holzschliff" *EUCEPA Conference*, Florence, 1 (11); 1-25 (1986).
70. Leask, R.A. et al, "Mechanical pulping", TAPPI, Pulp and Paper manufacture, 2 (11); 138-164 (1987).
71. Milton, H.V., "The bleaching of pulp", TAPPI Monograph 27, chap. 12, 212-260 (1963).
72. Baillargeon, G., "Technique de régression multiple; méthode statistique de l'ingénieur", *Département de mathématiques et d'informatique, UQTR*, Vol. 2, (s.d.).
73. Neuville, A.M., Kennedy, J.B., "Basic statistical methods for engineers and scientist", *International Texbook Company* (1964).

ANNEXE A

Analyse statistique

Aux sections 2.7 et 3.3, nous avons présenté la terminologie et les règles de base utilisés pour le traitement statistique. Dans la section qui suit, nous décrivons mathématiquement ces concepts (72,73).

Analyse de corrélation

Le degré d'association entre les deux variables est mesuré par le coefficient de corrélation "r" et s'exprime de la façon suivante:

$$r = \text{COV} (X,Y) / [V (X) * V (Y)]^{0.5}$$

$$\text{où } -1 \leq r \leq 1$$

Les valeurs des coefficients de corrélation sont obtenues à l'aide du programme qui effectue l'analyse de régression. Le test d'hypothèse sur les coefficients de corrélation nous permet de déterminer si ces valeurs sont significatives ou

simplement dues au hasard. Pour que le coefficient soit statistiquement significatif, il doit être plus grand ou égal à la valeur trouvée dans le tableau A1. Cette valeur est fonction du seuil de signification désiré, du nombre total de paramètres étudiés et du nombre d'observations.

Analyse de régression

L'analyse de régression permet de déterminer la valeur du Fisher "F" et le coefficient de détermination multiple "R²" associé à chacune des corrélations statistiquement significatives. Le Fisher permet de déterminer le niveau de contribution de l'ensemble des variables analysées pour expliquer les fluctuations de la variable dépendante au seuil de signification α choisi. Nous effectuons le test d'hypothèse qui suit pour conclure que cette contribution est significative au seuil α :

Hypothèse nulle:

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

(aucune contribution significative des X_i)

Hypothèse alternative:

$$H_1 : \text{au moins un des } \beta_i = 0$$

(au moins une variable (X_i) apporte une contribution significative)

La règle de décision de ce test d'hypothèse est:

$$\text{rejeter } H_0 \text{ si } F \geq F_{\alpha; k, n-k-1}$$

Pour ce test d'hypothèse, nous utilisons la table de variance du programme d'analyse statistique reproduite au tableau A2. Nous comparons le carré moyen dû à la régression (CMR) avec le carré moyen résiduel ($CM_{rés}$). La valeur observée du Fisher (F) est donc:

$$F = CMR / CM_{rés}$$

Cette valeur du Fisher est distribuée selon la loi de Fisher avec k et n-k-1 degré de liberté. La contribution est significative si la valeur observée du F est plus grande ou égale à la valeur trouvée du F au seuil de signification α qui est égal à 5% dans le tableau A3. Alors, l'hypothèse nulle (H_0) est rejetée.

Tableau A1: Valeurs des coefficients de corrélation r

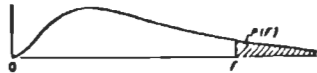
r	5 Percent Level of Significance				1 Percent level of Significance				r	
	Total number of variables				Total number of variables					
	2	3	4	5	2	3	4	5		
1	.997	.999	.999	.999	1.000	1.000	1.000	1.000	1	
2	.950	.975	.983	.987	.990	.995	.997	.998	2	
3	.878	.930	.950	.961	.959	.976	.983	.987	3	
4	.811	.881	.912	.930	.917	.949	.962	.970	4	
5	.754	.836	.874	.898	.874	.917	.937	.949	5	
6	.707	.795	.839	.867	.834	.886	.911	.927	6	
7	.666	.758	.807	.838	.798	.855	.885	.904	7	
8	.632	.726	.777	.811	.765	.827	.860	.882	8	
9	.602	.697	.750	.786	.735	.800	.836	.861	9	
10	.576	.671	.726	.763	.708	.776	.814	.840	10	
11	.553	.648	.703	.741	.684	.753	.793	.821	11	
12	.532	.627	.683	.722	.661	.732	.773	.802	12	
13	.514	.608	.664	.703	.641	.712	.755	.785	13	
14	.497	.590	.646	.686	.623	.694	.737	.768	14	
15	.482	.574	.630	.670	.606	.677	.721	.752	15	
16	.468	.559	.615	.655	.590	.662	.706	.738	16	
17	.456	.545	.601	.641	.575	.647	.691	.724	17	
18	.444	.532	.587	.628	.561	.633	.678	.710	18	
19	.433	.520	.575	.615	.549	.620	.665	.698	19	
20	.423	.509	.563	.604	.537	.608	.652	.685	20	
21	.413	.498	.552	.592	.526	.596	.641	.674	21	
22	.404	.488	.542	.582	.515	.585	.630	.663	22	
23	.396	.479	.532	.572	.505	.574	.619	.652	23	
24	.388	.470	.523	.562	.496	.565	.609	.642	24	
25	.381	.462	.514	.553	.487	.555	.600	.633	25	
26	.374	.454	.506	.545	.478	.546	.590	.624	26	
27	.367	.446	.498	.536	.470	.538	.582	.615	27	
28	.361	.439	.490	.529	.463	.530	.573	.606	28	
29	.355	.432	.482	.521	.456	.522	.565	.598	29	
30	.349	.426	.476	.514	.449	.514	.558	.591	30	
35	.325	.397	.445	.482	.418	.481	.523	.556	35	
40	.304	.373	.419	.455	.393	.454	.494	.526	40	
45	.288	.353	.397	.432	.372	.430	.470	.501	45	
50	.273	.336	.379	.412	.354	.410	.449	.479	50	
60	.250	.308	.348	.380	.325	.377	.414	.442	60	
70	.232	.286	.324	.354	.302	.351	.386	.413	70	
80	.217	.269	.304	.332	.283	.330	.362	.389	80	
90	.205	.254	.288	.315	.267	.312	.343	.368	90	
100	.195	.241	.274	.300	.254	.297	.327	.351	100	
125	.174	.216	.246	.269	.228	.266	.294	.316	125	
150	.159	.198	.225	.247	.208	.244	.270	.290	150	
200	.138	.172	.196	.215	.181	.212	.234	.253	200	
300	.113	.141	.160	.176	.148	.174	.192	.208	300	
400	.098	.122	.139	.153	.128	.151	.167	.180	400	
500	.088	.109	.124	.137	.115	.135	.150	.162	500	
1,000	.062	.077	.088	.097	.081	.096	.106	.116	1,000	

Tableau A2: Table de variance du programme d'analyse statistique

TABLE DE VARIANCE POUR LE MODELE:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \epsilon$$

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen	F calculé
Variation totale (SCT)	$\sum_i (Y_i - \bar{Y})^2$	n-1		
Variation due à la régression (SC _{reg})	$\sum_i (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$	k	$\frac{CMR}{k}$	$F = \frac{CMR}{CM_{res}}$
Variation résiduelle (SC _{res})	$\sum_i (Y_i - \hat{Y}_i)^2$	n-k-1	$\frac{CM_{res}}{n-k-1}$	

Tableau A3: Distribution du rapport de variance F ($\alpha=5\%$)


$\alpha \backslash \nu_2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54	241.88	243.01	243.95	244.81	245.55	246.19	246.75	247.23	247.63	247.92
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50	19.50
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.76	8.74	8.74	8.74	8.74	8.74	8.74	8.74	8.74
4	7.71	6.94	6.55	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.84	5.82	5.80	5.79	5.78	5.77	5.77
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.84	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.10	2.99	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.55	2.51	2.47	2.43	2.39	2.34	2.30
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.02	2.91	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.95	2.84	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.30	2.25	2.21	2.16	2.11	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.97	2.81	2.70	2.62	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.24	2.20	2.15	2.11	2.06	2.01	1.96
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.55	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.52	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.94	1.89	1.84
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.00	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.73	1.68	1.62
40	4.10	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.44	1.38	1.29
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00

De plus, nous évaluons la qualité de l'ajustement de l'équation de régression entre la variable dépendante Y et l'ensemble des variables explicatives X_i . Pour ce faire, nous utilisons le coefficient de détermination multiple R^2 qui représente la variation due à la régression divisée par la variation totale.

Ce coefficient permet d'évaluer la proportion de la variation des Y_i autour de la moyenne \bar{Y} qui est expliquée par l'ensemble des variables indépendantes X_j individuellement significatives qui se définit de la façon suivante:

$$R^2 = \frac{\sum(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum(Y_i - \bar{Y})^2}$$

$$\text{avec } 0 \leq R^2 \leq 1$$

Erreur expérimentale et manque d'ajustement du modèle postulé

L'analyse statistique des données génère des équations de prédiction. Ces équations doivent être éprouvées à l'aide du test de Fisher avant d'être validé.

Dans notre planification expérimentale, nous avons prévu de répéter chaque expérience de manière à pouvoir vérifier le manque d'ajustement du modèle. Ces répétitions permettent de subdiviser la somme des carrés résiduelle ($SC_{rés}$) en deux composantes:

- 1) une somme des carrés pour l'erreur expérimentale (SC_{err})
- 2) une somme des carrés pour le manque d'ajustement du modèle postulé ($SC_{m.a.}$)

D'après la table de variance du programme d'analyse statistique, la somme des carrés totale est égale à la somme des carrés due à la régression plus la somme des carrés résiduelle. Mais, la répétition des expériences donne l'équation suivante:

$$SCT = SC_{rég} + SC_{err} + SC_{m.a.}$$

Cependant, la somme des carrés pour le manque d'ajustement est égale à zéro pour le modèle complet de régression multiple. De plus, avec ce modèle, nous obtenons directement une estimation de l'erreur expérimentale car:

$$SC_{rés} = SC_{err} = \epsilon$$

L'analyse statistique générant une équation de régression simplifiée pour chacune des variables dépendantes étudiées, la somme des carrés résiduelle ne représente plus l'estimation de l'erreur expérimentale et son calcul se fait à l'aide de l'équation suivante:

$$SC_{err} = \sum \left[\sum_1^{n_i} (Y_i - \bar{Y}_i)^2 \right]$$

où n_i : nombre de répétitions pour la valeur X_i

Une fois SC_{err} calculée, la somme des carrés pour le manque d'ajustement du modèle simplifié peut être évaluée par la relation suivante:

$$SC_{m.a.} = SC_{rés} - SC_{err}$$

Où la valeur de $SC_{rés}$ est prise directement dans la table de variance du programme d'analyse statistique. On peut donc voir à l'aide du modèle de prédiction réduit si la partie non expliquée est attribuable à l'erreur expérimentale ou au manque d'ajustement du modèle. Si c'est un manque d'ajustement qui prévaut, on introduit une nouvelle variable dans le modèle parmi celles qui n'ont pas été retenues dans le modèle réduit. Cette variable sera introduite dans le modèle si elle répond au test statistique du Fisher. Dans la première partie de nos travaux, nous avons effectué 12 expériences en deux étapes (trituration et flottation) répétées une fois chacune pour un total de 48 observations. Il y a donc 24 degrés de liberté pour expliquer l'erreur expérimentale. Ainsi, le logiciel statistique peut utiliser jusqu'à 23 degrés pour définir les facteurs explicatifs et un degré pour déterminer la constante β_0 . Le modèle proposé est un modèle simplifié c'est-à-dire que l'introduction des paramètres explicatifs se fait un à un par ordre décroissant de Fisher. Cette façon de procéder permet de vérifier le manque d'ajustement du modèle.

ANNEXE B

Cette annexe présente toutes les expériences effectuées ainsi que les valeurs expérimentales obtenues. Les lettres a et b indiquent la répétition des séries. Les lettres T et F représentent respectivement la trituration et la flottation. Dans la première partie, le blanchiment est réalisé au tritrateur à différentes consistances (tableaux B1 à B4). Dans la seconde partie, la pâte est désencrée sans agent de blanchiment et par la suite blanchie dans une tour externe (tableaux B5 à B8). Finalement, pour la troisième partie, le blanchiment est réalisé au tritrateur à la consistance sélectionnée (10%) dans la première partie de notre expérimentation (tableau B9).

Partie 1

Tableau B1: Conditions et résultats expérimentaux du blanchiment de la pâte désencrée au triturateur avec 1% de peroxyde (première série)

Expériences	1a		2a		3a		4a		5a		6a	
Etapas	T	F	T	F	T	F	T	F	T	F	T	F
Temps (min)	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10
Température (°C)	25	40	25	40	25	40	25	40	25	40	25	40
pH (NaOH)	10.5	9.0	10.5	9.0	10.5	9.0	10.5	9.0	10.5	9.0	10.5	9.0
Oléate de sodium (%)	2	-	2	-	2	-	2	-	2	-	2	-
CaCl ₂ (ppm)	-	180	-	180	-	180	-	180	-	180	-	180
Na ₂ SiO ₃ (%)	3.0	-	3.0	-	3.0	-	3.0	-	3.0	-	3.0	-
DTPA (%)	0.3	-	0.3	-	0.3	-	0.3	-	0.3	-	0.3	-
H ₂ O ₂ (%)	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-
Consistances (%)	2	0.4	5	0.4	7.5	0.4	10	0.4	15	0.4	20	0.4
Blancheur ISO (%)	55.1	57.7	57.8	58.8	59.6	59.0	59.8	61.4	61.3	62.6	59.9	60.9
Luminosité (%)	81.82	84.12	83.40	84.34	84.82	84.82	85.07	86.04	86.17	87.30	85.14	86.37
Coordonnée b* (bleu-jaune)	5.45	7.01	5.68	6.28	6.41	6.96	6.45	6.88	7.19	7.89	6.58	7.74
H ₂ O ₂ résiduel (%)	1.06	1.18	0.90	0.76	0.87	0.64	0.83	0.68	0.64	0.47	0.52	0.43

Tableau B2: Conditions et résultats expérimentaux du blanchiment de la pâte désencrée au tritrateur avec 2% de peroxyde (première série)

Expériences	7a		8a		9a		10a		11a		12a	
Etapas	T	F	T	F	T	F	T	F	T	F	T	F
Temps (min)	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10
Température (°C)	25	40	25	40	25	40	25	40	25	40	25	40
pH (NaOH)	10.5	9.0	10.5	9.0	10.5	9.0	10.5	9.0	10.5	9.0	10.5	9.0
Oléate de sodium (%)	2	-	2	-	2	-	2	-	2	-	2	-
CaCl ₂ (ppm)	-	180	-	180	-	180	-	180	-	180	-	180
Na ₂ SiO ₃ (%)	3.0	-	3.0	-	3.0	-	3.0	-	3.0	-	3.0	-
DTPA (%)	0.3	-	0.3	-	0.3	-	0.3	-	0.3	-	0.3	-
H ₂ O ₂ (%)	2	-	2	-	2	-	2	-	2	-	2	-
Consistances (%)	2	0.4	5	0.4	7.5	0.4	10	0.4	15	0.4	20	0.4
Blancheur ISO (%)	55.3	58.0	57.5	60.3	61.0	62.4	61.7	63.3	61.3	62.0	62.7	62.1
Luminosité (%)	81.55	83.95	83.23	84.79	85.35	86.13	86.43	87.55	85.92	87.29	86.57	87.42
Coordonnée b* (bleu-jaune)	4.88	6.43	5.53	5.75	5.84	6.17	7.19	7.73	6.48	8.42	6.39	8.44
H ₂ O ₂ résiduel (%)	1.97	1.61	1.83	1.45	1.74	1.48	1.69	1.27	1.32	1.05	1.08	1.12

Tableau B3: Conditions et résultats expérimentaux du blanchiment de la pâte désencrée au triturateur avec 1% de peroxyde (deuxième série)

Expériences	1b		2b		3b		4b		5b		6b	
Etapes	T	F	T	F	T	F	T	F	T	F	T	F
Temps (min)	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10
Température (°C)	25	40	25	40	25	40	25	40	25	40	25	40
pH (NaOH)	10.5	9.0	10.5	9.0	10.5	9.0	10.5	9.0	10.5	9.0	10.5	9.0
Oléate de sodium (%)	2	-	2	-	2	-	2	-	2	-	2	-
CaCl ₂ (ppm)	-	180	-	180	-	180	-	180	-	180	-	180
Na ₂ SiO ₃ (%)	3.0	-	3.0	-	3.0	-	3.0	-	3.0	-	3.0	-
DTPA (%)	0.3	-	0.3	-	0.3	-	0.3	-	0.3	-	0.3	-
H ₂ O ₂ (%)	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-
Consistances (%)	2	0.4	5	0.4	7.5	0.4	10	0.4	15	0.4	20	0.4
Blancheur ISO (%)	55.7	57.6	57.5	59.9	60.0	59.9	59.4	61.3	61.3	60.3	60.9	59.7
Luminosité (%)	82.07	83.84	82.83	84.20	85.48	85.82	84.70	85.44	86.03	86.58	85.78	86.17
Coordonnée b* (bleu-jaune)	5.39	6.79	5.87	5.49	7.27	7.92	6.23	5.91	6.76	8.66	6.89	8.74
H ₂ O ₂ résiduel (%)	0.97	0.91	0.87	0.80	0.74	0.61	0.81	0.65	0.63	0.57	0.46	0.44

Tableau B4: Conditions et résultats expérimentaux du blanchiment de la pâte désencrée au tritrateur avec 2% de peroxyde (deuxième série)

Expériences	7b		8b		9b		10b		11b		12b	
Etapas	T	F	T	F	T	F	T	F	T	F	T	F
Temps (min)	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10
Température (°C)	25	40	25	40	25	40	25	40	25	40	25	40
pH (NaOH)	10.5	9.0	10.5	9.0	10.5	9.0	10.5	9.0	10.5	9.0	10.5	9.0
Oléate de sodium (%)	2	-	2	-	2	-	2	-	2	-	2	-
CaCl ₂ (ppm)	-	180	-	180	-	180	-	180	-	180	-	180
Na ₂ SiO ₃ (%)	3.0	-	3.0	-	3.0	-	3.0	-	3.0	-	3.0	-
DTPA (%)	0.3	-	0.3	-	0.3	-	0.3	-	0.3	-	0.3	-
H ₂ O ₂ (%)	2	-	2	-	2	-	2	-	2	-	2	-
Consistances (%)	2	0.4	5	0.4	7.5	0.4	10	0.4	15	0.4	20	0.4
Blancheur ISO (%)	56.5	58.6	60.2	61.4	60.4	60.6	62.5	62.7	61.4	61.3	62.0	60.5
Luminosité (%)	82.57	84.42	85.03	86.18	85.35	86.06	86.73	87.29	86.16	87.00	86.08	86.42
Coordonnée b* (bleu-jaune)	5.44	6.90	6.10	7.09	6.60	7.70	6.99	7.84	6.95	8.57	6.43	8.46
H ₂ O ₂ résiduel (%)	1.97	1.67	1.87	1.61	1.75	1.72	1.52	1.13	1.40	1.23	0.90	1.13

Partie 2

Tableau B5: Conditions expérimentales de la pâte désencrée qui sera blanchie en un stage dans une tour externe à l'aide du peroxyde et de l'hydrosulfite

	Trituration	Flottation
Consistance (%)	10	0.4
Na_2SiO_3 (%)	3.0	-
pH (NaOH)	10.5	9.0
Température (°C)	25	40
Temps (min.)	20	10
Oléate de sodium (%)	2	-
CaCl_2 (ppm)	-	180

Tableau B6: Conditions et résultats expérimentaux du blanchiment externe au peroxyde de la pâte désencrée (première série)

Expériences	15a	16a	17a	18a	19a	20a
Consistances (%)	12	12	12	25	25	25
Température (°C)	70	70	70	70	70	70
Temps (min)	90	90	90	90	90	90
pH initial	10.4	10.6	10.8	10.2	10.4	10.7
pH final	9.1	8.9	9.0	9.1	9.4	8.9
Na ₂ SiO ₃ (%)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
MgSO ₄ (%)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
NaOH (%)	0.768	0.864	2.064	0.768	0.864	2.064
DTPA (%)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
H ₂ O ₂ (%)	0.36	1.00	2.00	0.10	1.00	2.00
Blancheur ISO (%)	61.5	67.2	69.7	59.5	68.3	70.9
Luminosité (%)	86.66	89.75	90.79	84.56	89.99	91.12
Coordonnée b* (bleu-jaune)	7.80	7.99	7.57	6.10	7.58	7.17
Opacité (%)	97.1	93.8	91.8	98.1	94.0	91.2
Longueur de rupture (km)	2.51	3.78	4.50	2.71	3.52	4.23
Indice de déchirure (mN*m ² /g)	7.03	7.43	6.92	7.47	7.70	6.73
Indice d'éclatement (kPa*m ² /g)	1.71	1.87	2.24	1.83	1.94	2.26
H ₂ O ₂ résiduel (%)	0.03	0.35	0.66	0.00	0.23	0.43

Tableau B7: Conditions et résultats expérimentaux du blanchiment externe au peroxyde de la pâte désencrée (deuxième série)

Expériences	15b	16b	17b	18b	19b	20b
Consistances	12	12	12	25	25	25
Température (°C)	70	70	70	70	70	70
Temps (min)	90	90	90	90	90	90
pH initial	10.4	10.6	10.8	10.2	10.4	10.7
pH final	9.1	8.9	9.0	9.1	9.4	8.9
Na ₂ SiO ₃ (%)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
MgSO ₄ (%)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
NaOH (%)	0.768	0.864	2.064	0.768	0.864	2.064
DTPA (%)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
H ₂ O ₂ (%)	0.36	1.00	2.00	0.10	1.00	2.00
Blancheur ISO (%)	61.7	66.9	69.5	59.4	68.3	70.6
Luminosité (%)	86.90	89.54	90.75	84.57	90.02	90.97
Coordonnée b* (bleu-jaune)	8.05	7.94	7.73	6.21	7.53	7.21
Opacité (%)	95.8	94.7	92.7	98.0	94.0	92.1
Longueur de rupture (km)	3.21	3.57	4.19	2.58	3.60	4.14
Indice de déchirure (mN·m ² /g)	7.32	7.31	7.35	7.06	7.69	7.65
Indice d'éclatement (kPa·m ² /g)	1.95	1.99	2.26	1.73	2.07	2.16
H ₂ O ₂ résiduel (%)	0.03	0.35	0.64	0.00	0.23	0.41

Tableau B8: Conditions et résultats expérimentaux du blanchiment externe à l'hydrosulfite de la pâte désencrée (première et deuxième séries)

Expériences	21a	21b	22a	22b	23a	23b
Consistances (%)	10	10	10	10	10	10
Température (°C)	60	60	60	60	60	60
Temps (min)	60	60	60	60	60	60
DTPA (%)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
pH (H ₂ SO ₄)	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
Na ₂ S ₂ O ₄ (%)	0.3	0.3	0.5	0.5	1.0	1.0
Blancheur ISO (%)	61.6	62.0	62.4	64.3	63.3	63.4
Luminosité (%)	84.67	84.78	85.47	87.03	85.68	85.86
Coordonnée b* (bleu-jaune)	4.31	4.16	5.00	5.88	4.55	4.68
Opacité (%)	98.0	97.9	97.6	96.8	97.7	97.0
Longueur de rupture (km)	3.55	3.03	3.20	3.38	3.25	3.66
Indice de déchirure (mN·m ² /g)	7.05	7.36	7.11	6.94	7.63	7.13
Indice d'éclatement (kPa·m ² /g)	2.10	2.01	2.14	2.02	2.05	2.12

Partie 3

Tableau B9: Conditions et résultats expérimentaux du blanchiment de la pâte désencrée au tritrateur à 10% de consistance avec 1 et 2% de peroxyde (première et deuxième séries)

Expériences	24a		24b		25a		25b	
Etapes	T	F	T	F	T	F	T	F
Température (°C)	25	40	25	40	25	40	25	40
Temps (min)	20	10	20	10	20	10	20	10
Consistances (%)	10	0.4	10	0.4	10	0.4	10	0.4
pH (NaOH)	10.5	9.0	10.5	9.0	10.5	9.0	10.5	9.0
Oléate de sodium (%)	2	-	2	-	2	-	2	-
CaCl ₂ (ppm)	-	180	-	180	-	180	-	180
Na ₂ SiO ₃ (%)	3.0	-	3.0	-	3.0	-	3.0	-
DTPA (%)	0.3	-	0.3	-	0.3	-	0.3	-
H ₂ O ₂ (%)	1.0	-	1.0	-	2.0	-	2.0	-
Blancheur ISO (%)	62.5	61.2	62.0	61.1	64.2	62.2	64.1	61.9
Luminosité (%)	86.03	84.96	85.77	85.26	86.92	85.41	86.98	85.06
Coordonnée b* (bleu-jaune)	5.79	5.14	5.72	5.72	5.70	4.99	5.84	4.59
Opacité (%)	97.0	97.5	96.9	97.5	95.7	97.7	96.3	97.6
Longueur de rupture (km)	3.82	4.19	3.96	4.02	4.17	3.51	4.29	3.70
Indice de déchirure (mN*m ² /g)	6.03	6.44	6.11	7.49	6.80	7.01	6.76	7.03
Indice d'éclatement (kPa*m ² /g)	2.14	2.28	2.15	2.12	2.19	2.10	2.31	2.13
H ₂ O ₂ résiduel (%)	0.73	0.70	0.72	0.63	1.64	1.64	1.63	1.60